



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

SNIŽOVÁNÍ VIBRACÍ A HLUČNOSTI LOŽISEK

REDUCING VIBRATION AND NOISE OF BEARINGS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Martin Nejeschleba

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Róbert Jankových, CSc.

BRNO 2020

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student: **Bc. Martin Nejeschleba**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Kvalita, spolehlivost a bezpečnost
Vedoucí práce: **doc. Ing. Róbert Jankových, CSc.**
Akademický rok: 2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Snižování vibrací a hlučnosti ložisek

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Ve spolupracující firmě je řešen problém zvýšené míry hlučnosti a vibrací u některých typů ložisek. Úkolem diplomové práce je navrhnout a ověřit vhodná opatření řešící uvedený problém u valivého ložiska.

Cíle diplomové práce:

Popis současného stavu procesu kontroly kvality valivého ložiska.
Systémový rozbor hodnocení kvality ložisek pomocí vibrační diagnostiky a diagnostiky hluku.
Návrh a zdůvodnění vybraného postupu řešení problému zvýšených vibrací a hlučnosti analyzovaného typu ložiska.
Realizace vybraného postupu.
Technické posouzení dosažených výsledků.
Vlastní závěry a doporučení pro praxi.

Seznam doporučené literatury:

BERAN, Vlastimil. Chvění a hluk. Plzeň: Západočeská univerzita, 2010. ISBN 978-80-7043-916-6.

NOVÝ, Richard. Hluk a chvění. Vyd. 3. Praha: České vysoké učení technické, 2009. ISBN 978-80--1-04347-9.

HELEBRANT, František a Jiří ZIEGLER. Technická diagnostika a spolehlivost. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2004. ISBN 80-248-0650-9.

TŮMA, Jiří. Signal processing. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2009. ISBN 978-80-248-2114-6.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práca sa zaoberá problematikou hlučnosti ložísk. Hlučnosť ako negatívny fenomén sa vyskytuje u všetkých strojných súčastí, ktoré vykonávajú pohyb. Analýzou tohto javu je možné zistiť technický stav ložiska ako aj predpovedať jeho poškodenie. Teoretická časť je venovaná vibračnej diagnostike a diagnostike hluku, ktoré spolu úzko súvisia. V praktickej časti je riešený reálny problém hlučnosti zvoleného typu ložiska v strojárskkej firme. Hlavným prínosom práce je návrh a úspešná realizácia opatrení vedúcich k zníženiu hlučnosti vybraného typu ložiska.

ABSTRACT

The diploma thesis deals with the issue of bearings noisiness. The bearings noisiness appears as a negative phenomenon in all the mechanical devices that generate any kind of movement. Analysis of this phenomenon enables to analyse the technical condition of the bearing and predict its defects as well. The theoretical part of the thesis is devoted to the vibration diagnostics and noisiness diagnostics, which are deeply linked. The practical part of the thesis deals with the real problem of the bearing's noisiness in the engineering company. The main asset of this thesis is a design and successful implementation of the measures, which reduce noisiness of the selected type of the bearing.

KĽÚČOVÉ SLOVÁ

Valivé ložiská, vibrácie, hlučnosť, kruhovitosť, vlnitosť

KEYWORDS

Roller bearings, vibrations, noisiness, roundness, waviness

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

NEJESCHLEBA, Martin. *Snižování vibrací a hlučnosti ložisek*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124490>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Róbert Jankových.

POĎAKOVANIE

Rád by som sa poďakoval vedúcemu práce doc. Ing. Róbertovi Jankovýchovi, CSc. za trpezlivosť, ochotu, odborné pripomienky a prístup pri vypracovaní tejto diplomovej práce.

Ďalej by som sa rád poďakoval firme Schaeffler Skalica, spol. s r.o. za možnosť spolupráce na ich projekte, konkrétne Ing. Petrovi Hlavatému za vecné rady, priateľský prístup a pomoc pri vypracovaní praktickej časti práce. Rovnako moje poďakovanie patrí aj tímu technologov podniku, menovite Ing. Petrovi Caletkovi a Ing. Miroslavovi Krušinovi.

Rovnako by som sa rád poďakoval Českému metrologickému inštitútu v Brne za možnosť použitia ich meracieho zariadenia a to najmä Ing. Janovi Šrámekovi, PhD. za pomoc pri meraní.

V neposlednom rade patrí moja obrovská vďaka celej mojej rodine, ktorá pri mne vždy stála a podporovala ma.

Nakoniec patrí vďaka mojej mame, na ktorej večnú pamiatku je táto práca venovaná.

ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že táto práca je mojím pôvodným dielom, vypracoval som ju samostatne pod vedením doc. Ing. Róberta Jankovýcha, CSc. a s použitím literatúry uvedenej v zozname.

V Brne dne 26.6. 2020

.....
Nejeschleba Martin

OBSAH

1	ÚVOD	17
2	MOTIVÁCIA	19
3	VALIVÉ LOŽISKÁ	21
3.1	Kvalita ložísk.....	22
3.2	Konštrukčné údaje valivých ložísk	22
3.2.1	Hlavné rozmery a presnosť ložísk	22
3.2.2	Vnútoraná vôľa.....	22
3.2.3	Klietka.....	23
3.3	Základné parametre valivých ložísk	23
3.3.1	Základná dynamická únosnosť	23
3.3.2	Trvanlivosť.....	23
3.3.3	Životnosť.....	23
3.3.4	Ekvivalentné dynamické zaťaženie	23
3.3.5	Vplyv teploty.....	24
3.3.6	Základná statická únosnosť	24
3.3.7	Medzná frekvencia otáčania.....	24
3.4	Mazanie	24
3.4.1	Mazanie plastickým mazivom.....	24
3.4.2	Mazanie olejom	24
3.5	Výroba valivých ložísk	25
3.5.1	Výroba valivých teliesok	25
3.5.2	Výroba klietok.....	26
3.5.3	Výroba krúžkov	26
3.5.4	Obrobenie na sústružníckych automatoch	27
3.5.5	Brúsenie čiel krúžkov	27
3.5.6	Brúsenie vonkajších rotačných plôch	27
3.5.7	Brúsenie vnútorných rotačných plôch	29
3.5.8	Dokončovanie vnútorných rotačných plôch.....	29
3.5.9	Montáž valčekových ložísk.....	30
4	VIBRÁCIE	33
4.1	Základná teória vibrácií.....	33
4.1.1	Voľné kmitanie a odozva mechanických systémov na vibrácie	33
4.1.2	Druhy diagnostického signálu	34
4.2	Snímače vibrácií	35
4.2.1	Vlastnosti a rozdelenie snímačov vibrácií.....	35
4.2.2	Druhy pasívnych snímačov	35
4.2.3	Druhy aktívnych snímačov.....	36
4.2.4	Vplyvy pôsobiace na snímače vibrácií	36
4.3	Základné metódy diagnostiky vibrácií.....	37
4.3.1	Frekvenčná analýza pomocou FFT.....	37
4.3.2	Crest faktor	38
4.3.3	Metóda K(t).....	39
4.3.4	Obáľková analýza.....	39
4.3.5	Metóda SPM.....	39
5	HLUČNOSŤ.....	41

5.1	Charakteristika hluku	41
5.1.1	Vznik hluku a jeho zdroje	41
5.2	Základné veličiny zvuku	42
5.2.1	Akustický tlak	42
5.2.2	Akustická rýchlosť	42
5.2.3	Rýchlosť zvuku	42
5.2.4	Vlnová dĺžka	42
5.2.5	Vlnová rovnica	42
5.2.6	Intenzita zvuku	42
5.2.7	Akustický výkon	43
5.3	Zdroje hluku	43
5.3.1	Hluk valivých ložísk	43
5.4	Metódy merania hluku	44
5.4.1	Technológia AEE	45
6	METÓDY MERANIA VIBRÁCIÍ A HLUČNOSTI LOŽÍSK	47
6.1	Vznik hlučnosti a vibrácií v ložisku	47
6.2	Meranie frekvenčným prístupom	47
6.2.1	Vlastné frekvencie komponentov ložísk	48
6.3	Meranie vibrácií podľa normy ISO 15242	49
6.3.1	Frekvencia otáčania	49
6.3.2	Zaťaženie ložiska	49
6.3.3	Meranie a vyhodnocovanie	49
6.3.4	Podmienky merania	50
6.3.5	Rozsah a smerovanie prítlačnej sily	51
6.3.6	Pozícia snímača	51
6.4	Meranie vibrácií v podniku	52
6.4.1	Princíp funkcie „hlukomeru“	53
6.4.2	Snímacia hlava	55
6.4.3	Mechanika radiálneho prítlaku	55
6.4.4	Otáčky vretena	55
7	ANALYZOVANIE SIGNÁLU	57
7.1	Geometrické tolerancie ložísk	58
7.1.1	Kruhovitosť	59
7.1.2	Obvodová vlnitosť	60
7.2	Meranie v podniku	60
7.2.1	Merací ostrovček	61
7.2.2	RTA analýza	61
7.2.3	Protokoly z podniku	62
7.3	Meranie v ČMI	62
7.3.1	Kruhomer	62
7.3.2	Postup merania	63
7.3.3	Protokoly z ČMI	63
7.4	Výsledky meraní	64
8	RIEŠENIE ZVÝŠENÝCH VIBRÁCIÍ	65
8.1	Analýza procesu výroby	65
8.1.1	Pôvodná technológia honovania	65
8.1.2	Nová technológia honovania	66
8.2	Simulácia procesu	67
8.2.1	Výsledky simulácie	68

8.2.2	Vyhodnotenie simulácie.....	73
8.3	Štatistické vyhodnotenie	75
8.4	Návrh opatrenia	75
9	ZHODNOTENIE	77
10	ZÁVER	79
11	ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV	81
12	ZOZNAM OBRÁZKOV A TABULIEK.....	83
12.1	Zoznam tabuliek	83
12.2	Zoznam obrázkov	83
13	ZOZNAM PRÍLOH	85

1 ÚVOD

V ideálnom svete bez trenia, rozmerových a geometrických odchýlok, homogenity alebo nesprávneho ustavenia neprenáša pohyb telies žiadnu energiu do okolia. V reálnom svete však neexistuje teleso, ktoré by sa nevykazovalo týmito vlastnosťami. Príkladom môže byť nevyváženosť hriadeľa, ktorá prenáša energiu do krytu a na iné časti stroja, v ktorom sa hriadeľ nachádza. Takáto energia má charakteristiku oscilačného pohybu, ktorý vyvoláva vibrácie.

Vibrácie sú jedným z vplyvov, ktoré vplyvajú na kvalitu výrobku. Ich zvýšením môže prísť k poškodeniu výrobku, ktoré by mohlo mať v určitých prípadoch fatálne následky. Preto je snaha výrobcov takéto vplyvy eliminovať. S vibráciami súvisí aj ďalší jav, a tým je hlučnosť. Hlučnosť, ako negatívny fenomén, má veľký význam. Tieto fenomény vo veľkej miere ovplyvňujú celé spektrum výrobku, od jeho životnosti cez spoľahlivosť po bezpečnosť a iné znaky kvality. Kvalita je pritom jednou z najdôležitejších parametrov výrobku.

Diplomová práca je rozdelená do 10 kapitol. Prvá a druhá kapitola, úvod a motivácia, pojednávajú o obsahu práce a podnetu jej realizácie.

Tretia kapitola sa venuje valivým ložiskám, ktoré sa používajú pre zníženie trenia a v určitej miere aj vibrácií. Sú opísané základné parametre valivých ložísk, mazanie a aj ich výroba, ktorou sa určuje ich kvalita.

Štvrtá a piata kapitola sú venované teórii vibrácií a hlučnosti. Sú predstavené teoretické základy oboch teórií a opis analýzy ložísk pomocou týchto fenoménov.

Šiesta kapitola pojednáva o metódach merania vibrácií a hlučnosti ložísk. V prvej časti sú informácie o ich vzniku, v druhej časti je opísané meranie vibrácií podľa normy ISO a nakoniec je opísaná funkcia merania vibrácií v podniku.

Siedmou kapitolou začína praktická časť práce. Kapitola je venovaná riešeniu reálneho problému vzniku hlučnosti konkrétneho typu ložiska v strojárskom podniku. Práve tento typ ložiska bol zákazníkom reklamovaný. Ložiská sa vykazovali zvýšenou hlučnosťou, ktorá bola pre zákazníka neakceptovateľná. Preto bol stanovený experiment zisťovania príčiny hlučnosti ložísk. Boli vytvorené dve skupiny, z ktorých jedna sa vykazovala zvýšenými hodnotami hlučnosti a druhá bola z hľadiska hlučnosti nezávadná. Ložiská boli najprv analyzované dostupnými technológiami v podniku a pre správnosť sa táto analýza zopakovala aj v Českom metrologickom inštitúte v Brne.

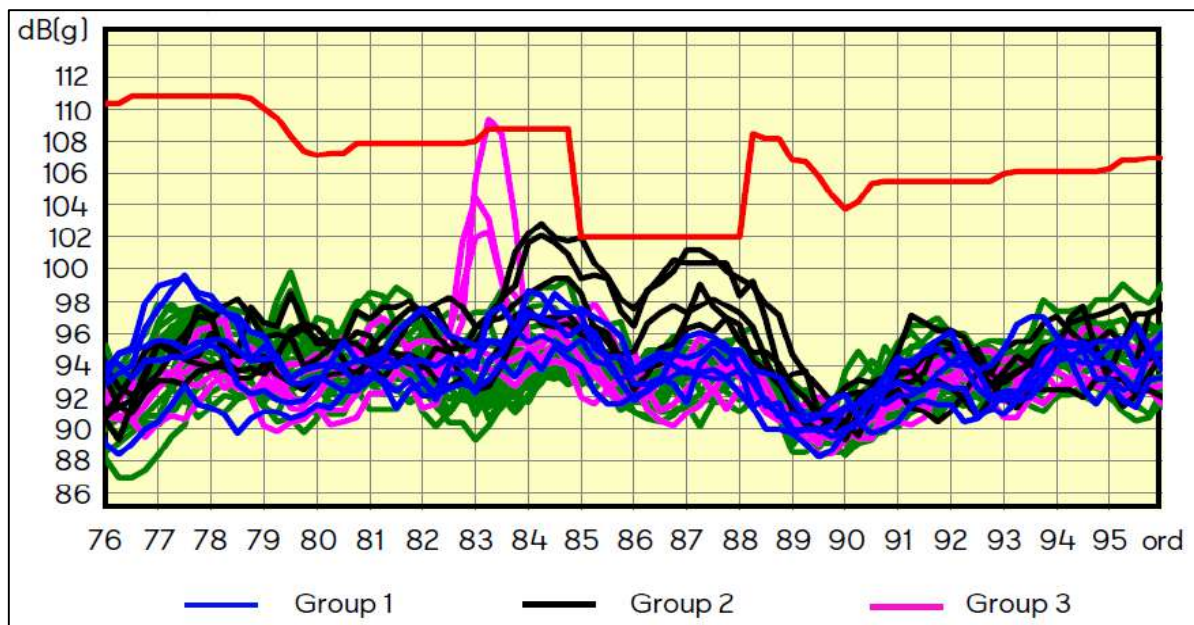
Ôsma kapitola je venovaná stanoveniu nápravného opatrenia. Ložisko pri výrobe prechádza rozličnými výrobnými procesmi. Preto bolo cieľom analyzovať celý proces výroby ložiska, nájsť slabé miesto a navrhnúť také opatrenie, aby sa daná chyba na ložisku nevyskytovala.

V posledných dvoch kapitolách je zhodnotenie a zhrnutie celého prínosu práce pre technickú prax.

Hlavným výsledkom práce je návrh a úspešná realizácia opatrení vedúcich k zníženiu hlučnosti vybraného typu ložiska.

2 MOTIVÁCIA

Na montážnej línii sa montujú valčekové ložiská. Tento typ bol ale reklamovaný zákazníkom s tým, že pri kontrole zostavenej prevodovky graf hlučnosti vykazoval nadmernú hodnotu a po následnej analýze sa ukázalo, že element, ktorý hlučnosť vytváral, bolo valivé ložisko. Zákazník analyzoval tri druhy ložiska a po analýze sa ukázalo, že každá skupina vykazovala inú hlučnosť. Na obrázku č. 1 je grafické zobrazenie troch skupín ložísk závislosti nameranej hlučnosti na frekvencii. Tento obrázok odoslal podniku zákazník ako dôkaz zvýšenej hlučnosti ložísk. Červená čiara ohraničuje horný limit hlučnosti závislosti na frekvenciu.

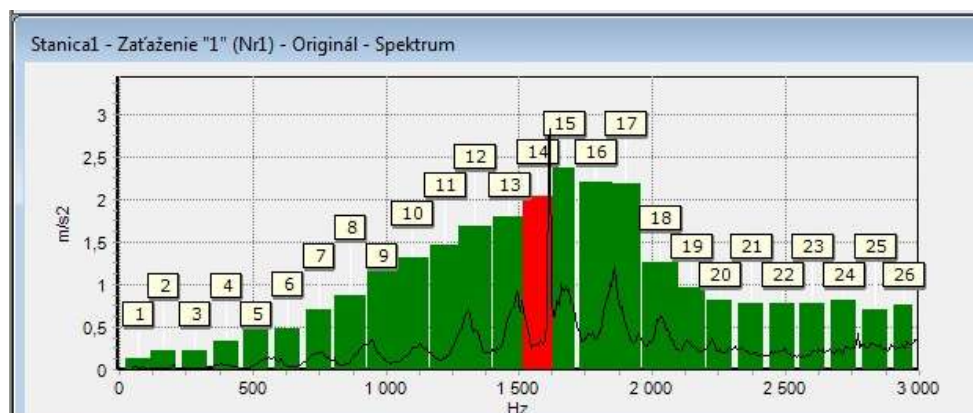


Obr. 1) Grafické zobrazenie reklamácie

Prvá skupina ložísk (group 1), označená modrou farbou, nevykazovala nadmernú hlučnosť. Ložiská boli následne skontrolované spolupracujúcim podnikom. Hodnoty kruhovitosti a vlnitosti boli v norme, RTA analýza neukázala žiadne prekročenie hranice a „hlukomer“ na segmente rovnako neukázal žiadne prekročenie hraničného poľa frekvenčného spektra.

Druhá skupina ložísk (group 2), označená čiernou farbou vykazovala limitné hodnoty hlučnosti. Po kontrole v podniku nebolo zistené prekročenie hodnoty kruhovitosti, vlnitosti alebo hraničnej krivky RTA, no po kontrole „hlukomerom“ bola zistená vada na valivom teliesku. Po kontrole valčekov bola zistená zvýšená hodnota kruhovitosti na 9. a 12. valčeku.

Tretia skupina ložísk (group 3), označená ružovou farbou, vykazovala prekročenie hraničnej krivky hlučnosti. Kontrolou nebola zistená zvýšená hodnota kruhovitosti, vlnitosti alebo hraničnej krivky RTA analýzy. Po kontrole „hlukomerom“ bolo ale zistené prekročenie hraničného poľa frekvenčného spektra označené číslom 14, vid' obrázok č.2.



Obr. 2) Chyba na 14. tolerančnom poli frekvenčného spektra

Nastavenie hlukomeru umožňuje identifikovať danú vadu na ložisku podľa rezonančných vlastností elementov a skúseností. Rozličné druhy závad na zmontovanom ložisku je tak možné určiť po kontrole „hlukomerom“. Pole číslo 14 ale nemá stanovenú žiadnu koreňovú príčinu.

Prvým cieľom tejto diplomovej práce bolo odhaliť možnú príčinu zvýšenej hlučnosti ložiska na skupine ložísk, ktoré sa takouto vadou budú vykazovať.

Druhým cieľom bolo oboznámiť sa s procesom výroby ložiska a proces výroby zlepšiť, aby sa táto vada nevyskytovala.

Pre splnenie cieľov a podľa pokynov vedúceho práce a na základe rady podniku bolo potrebné oboznámiť sa s vlastnosťami valivých ložísk, s ich výrobou a teóriami vibrácií a hlučnosti.

3 VALIVÉ LOŽISKÁ

Existuje viacero typov ložísk. Ložiská sa podľa smeru sily na nich pôsobiacej delia na axiálne a radiálne, podľa druhu pohybu na rotačné a lineárne a podľa ich funkcie na klzné, valivé a elektromagnetické. Valivé ložiská sa ďalej delia na guľôčkové, valčekové, súdočkové a kužeľové a podľa počtu obežných dráh na jednoradové a dvojradové, vo výnimočných prípadoch aj viacradové [1].

Valivé ložiská sú typom ložísk, ktoré pomocou valivých teliesok rovnomerne rozkladajú váhu medzi dvoma krúžkami. Relatívny pohyb týchto krúžkov spôsobuje otáčavý pohyb valivých teliesok s veľmi malým valivým odporom, čo výrazne znižuje trenie [1].

Skladajú sa z dvoch krúžkov, vonkajšieho, upnutého na konštrukcii a vnútorného, nalisovaného na hriadeli. Medzi krúžkami sa nachádzajú valivé telieska, čo môžu byť guľôčky, valčeky, ihličky, súdky alebo kužele uložené v kletke. Kletka zabezpečuje rovnomerné rozmiestnenie valivých elementov v ložisku a taktiež zabraňuje ich vzájomnému dotyku. Tým výrazne znižuje opotrebenie. Ďalšou funkciou kletky je zabránenie vypadnutiu valivých teliesok pri montážnom alebo demontážnom procese. Na obrázku č. 3 sú zobrazené rôzne druhy valivých ložísk [1].

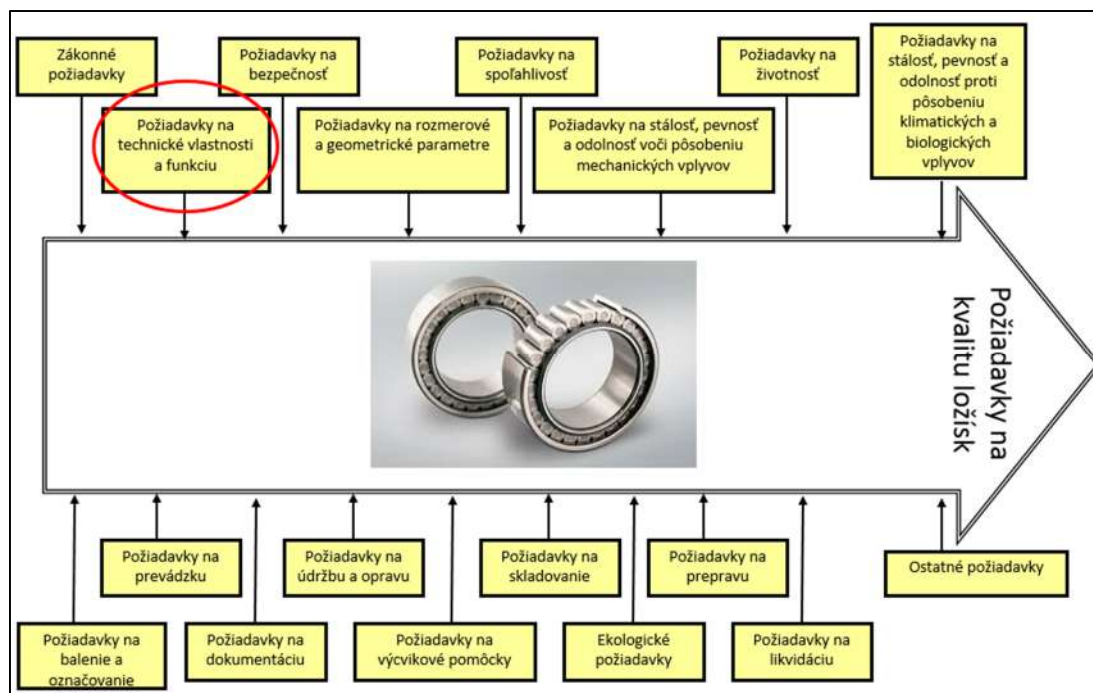
Prvá časť kapitoly sa venuje konštrukčným údajom, základným parametrom a typom mazania valivých ložísk. V druhej časti je opísaný ich proces výroby.



Obr. 3) Druhy valivých ložísk [2]

3.1 Kvalita ložísk

Na kvalitu ložísk vplýva obrovské množstvo parametrov, vid' obrázok č. 4. Diplomová práca sa okrem iného zaoberá vibráciami a hlučnosťou, ktoré patria práve do požiadaviek na technické vlastnosti a funkciu ložísk.



Obr. 4) Požiadavky na kvalitu ložísk [3]

3.2 Konštrukčné údaje valivých ložísk

Medzi konštrukčné údaje patria rozmery, vnútorná vôľa ložísk a parametre klieťky. Tieto sú popísané v nasledujúcich podkapitolách.

3.2.1 Hlavné rozmery a presnosť ložísk

Ložiská sa obvyčajne vyrábajú v rozmeroch, ktoré sú dané v medzinárodných normách ISO 15, ISO 355 a ISO 104. V katalógu ložísk prislúcha jednému priemeru diery ložiska niekoľko vonkajších priemerov a rôzne šírky krúžkov [1].

Pod presnosťou ložísk rozumieme presnosť ich rozmerov, tvaru a chodu. Ložiská sú rozdelené do určitých stupňov presnosti. Maximálne a minimálne tolerancie sú stanovené normami ISO 492 a ISO 199. Ložiská s vyššou presnosťou sa používajú v zariadeniach, ktoré vyžadujú vyššiu presnosť chodu [1].

3.2.2 Vnútorná vôľa

Vnútorná vôľa ložiska je hodnota určená posunutím jedného krúžka vzhľadom k druhému krúžku z jednej krajnej polohy do druhej. Toto posunutie môže byť v oboch smeroch, radiálnom i axiálnom. Jedná sa o najdôležitejší parameter vzhľadom k spoľahlivému chodu ložiska [1].

Zabudované ložiská majú vždy menšiu vôľu, čo je spôsobené veľkosťou presahov krúžkov na čape a v diere telesa. Tá je priamo závislá na zvolenej tolerancii. Na zmenšenie vôle má rovnako vplyv teplota ložiska počas prevádzky. Obyčajne má vyššiu teplotu vnútorný krúžok, lebo vonkajší krúžok býva chladený. Zmenu vnútornej vôle ovplyvňujú tak isto aj deformácie spôsobené zaťažením a ostatné externé zdroje tepelnej energie [1].

3.2.3 Klietka

Klietka zaručuje rovnomerné rozloženie valivých teliesok po obvode a zabráňuje ich vzájomnému dotyku a kĺzaniu. Rovnomerným rozložením sa znižuje trenie a opotrebenie, ktoré je vysoko nežiaduce a pri vyšších otáčkach by mohlo mať fatálne následky. Klietky taktiež zabráňujú vypadávaniu valivých teliesok pri montáži alebo demontáži ložísk [1].

Klietky sa vyrábajú lisovaním alebo sústružením [1].

3.3 Základné parametre valivých ložísk

Základné parametre alebo výpočty ložísk slúžia konštruktérovi pri správnej voľbe ložiska. Potrebná veľkosť ložiska je stanovená podľa pôsobenia vonkajších síl, podľa požiadaviek na trvanlivosť a spoľahlivosť ložiska pri jeho správnom uložení. Pre správnu voľbu druhu a veľkosti treba brať na zreteľ veľkosť, smer a spôsob zaťaženia rovnako ako aj frekvenciu otáčania. Pri výbere treba tiež myslieť na ďalšie zvláštne podmienky ako prevádzkovú teplotu, priestorové možnosti, zložitosť montáže, mazanie, tesnenia a pod [1].

3.3.1 Základná dynamická únosnosť

Základnou dynamickou únosnosťou je stále a nepremenné zaťaženie, ktoré môže ložisko teoreticky znášať pri základnej trvanlivosti milión otáčok. Veľkosť je daná rozmermi ložiska, počtom valivých teliesok, materiálom a konštrukciou [1].

3.3.2 Trvanlivosť

Pod pojmom trvanlivosť ložiska sa rozumie počet otáčok, ktoré vykoná jeden krúžok v závislosti na druhom, pokým sa neobjavia prvé známky únavy materiálu buď na valivých telieskach alebo obežnej dráhe. Pri výpočte trvanlivosti sa používa základná rovnica trvanlivosti, pri ktorej doba prevádzky ložiska prekročí spoľahlivosť 90% [1].

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P} \right)^p, \quad (1)$$

kde: L_{10} základná trvanlivosť,

C základná dynamická únosnosť,

P ekvivalentné dynamické zaťaženie ložiska [1].

Okrem základnej rovnice trvanlivosti ešte existuje rovnica upravenej trvanlivosti, ktorá zohľadňuje vplyv materiálu, maziva, spoľahlivosti a iné modifikácie tejto rovnice [1].

3.3.3 Životnosť

Životnosť ložiska je čas od prvého spustenia ložiska po jeho vyradenie z prevádzky aj z iných príčin než len únavy materiálu, napríklad po strate požadovaných vlastností alebo opotrebením. Na rozdiel od základnej trvanlivosti je životnosť menšia. Opotrebenie je často spôsobené nečistotami, koróziou alebo nesprávnym mazaním [1].

3.3.4 Ekvivalentné dynamické zaťaženie

Ložisko je často vystavené premenným silám rôznej veľkosti, smeru, ktoré pôsobia pri rôznych otáčkach a po rôznu dobu. Tieto vplyvy je potrebné prepočítať na konštantné zaťaženie, ktoré vyhovuje podmienkam platným pre základnú dynamickú únosnosť s rovnakým vplyvom na trvanlivosť ako skutočné zaťaženie. Takéto zaťaženie sa nazýva ekvivalentné radiálne alebo axiálne zaťaženie [1].

3.3.5 Vplyv teploty

Ložiská sú bežne produkované pre použitie v prostredí s teplotou do 120 °C, niektoré typy ložísk znesú teplotu do 180 °C. Pre vyššie teploty sú ložiská vystavené adekvátnemu tepelnému spracovaniu tak, aby sa zabezpečila stabilita rozmerov a potrebné vlastnosti [1].

3.3.6 Základná statická únosnosť

Základná statická únosnosť je zaťaženie zodpovedajúce vypočítaným stykovým napätím v najviac namáhanom pásme dotyku obežnej dráhy a valivého telieska. Styk takýchto dvoch telies s rovnakým tvarom povrchu spôsobuje nerovnomerné rozloženie tlaku v stykových plochách a zvýšené napätie na hranách povrchov, tzv. hranové napätie. Toto napätie spôsobovalo častý jav únavového opotrebovania na obežných dráhach ložiska. Pre odstránenie hranového napätia sa používajú modifikované stykové plochy, ktoré umožňujú určitú naklápacílosť valivých teliesok. Používajú sa vypuklé tzv. bombírované obežné dráhy [1].

3.3.7 Medzná frekvencia otáčania

Frekvencia otáčania závisí od niekoľkých parametrov. Od druhu ložiska, kletky, vnútornej vôle, prevádzkových podmienok, mazania a ďalších iných. Tieto parametre určujú vývin tepla v ložisku, a tým aj medzné otáčky, ktoré sú obmedzené predovšetkým teplotou maziva, teda chladením [1].

3.4 Mazanie

Hlavnou úlohou mazania je tvorba stabilného mazacieho filmu medzi dotykom obežnej dráhy a valivými telieskami a ochrana pred koróziou. Správne mazanie má priamy vplyv na trvanlivosť ložísk. V technickej praxi sa najviac používajú plastické mazivá a oleje. Vo výnimočných prípadoch sa používa mazanie pevnými mazivami [1].

3.4.1 Mazanie plastickým mazivom

Jednou z výhod tohto druhu mazania je jednoduchosť jeho uloženia, tesnenia a údržby. Pre spoľahlivú prevádzku sa naplní asi polovica až tretina voľného priestoru ložiska. Pri vyššom množstve maziva dochádza k negatívnemu efektu na prevádzku - zvýšenie teploty a predčasná degradácia maziva [1].

Pri použití plastického maziva treba dbať na domazávacie obdobie, ktoré stanovuje dobu výmeny maziva. Po skončení tejto doby stráca mazivo svoje požadované vlastnosti a je potrebné staré mazivo kompletne odstrániť a ložisko namazať novým. Domazávacie obdobie závisí od veľkosti ložiska, frekvencie otáčania, prevádzkovej teploty a kvalite maziva [1].

Pre valivé ložiská sa používajú prevažne minerálne alebo syntetické oleje, ktoré sú zahustené kovovými mydlami mastných kyselín [1].

3.4.2 Mazanie olejom

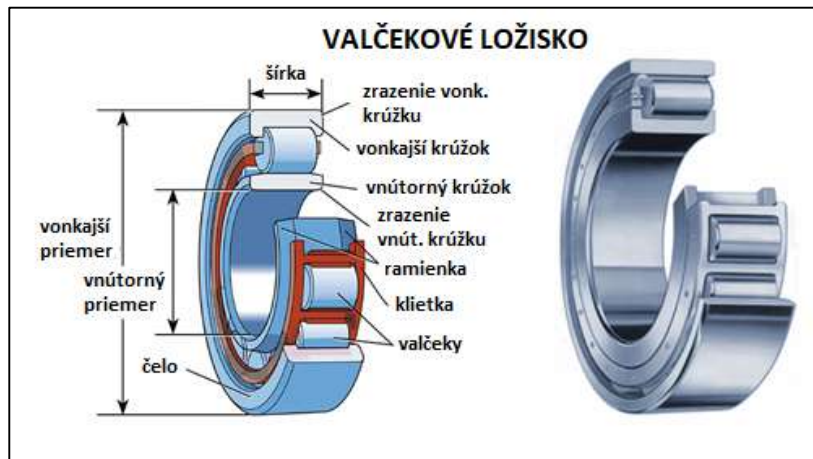
Tento druh mazania sa používa pri vysokých otáčkach a vysokej teplote. Mazanie olejom tiež zaručuje lepší odvod tepla z ložiska. Prívod mazania musí byť plynulý od začatia chodu po jeho zastavenie. Množstvo oleja tiež hrá dôležitú úlohu, pri vyššom množstve zvyšuje teplotu ložiska. Najdôležitejšou vlastnosťou oleja je viskozita, ktorá s teplotou rastie [1].

Ako mazacie oleje sa používajú rafinované oleje obohatené antioxidantnými prísadami [1].

Spôsobov mazania olejom je niekoľko. Pri ich aplikácii je treba dbať na konštrukciu objektu, v ktorom je ložisko uložené [1].

3.5 Výroba valivých ložisk

Výroba valivých ložisk je složitý a veľmi presný proces skladajúci sa z niekoľkých operácií. Každý komponent preto prechádza niekoľkými brúsnymi a dokončovacími operáciami, ktoré majú za úlohu zdokonaľiť jeho geometrické parametre. Na obrázku č. 5 je zobrazená konštrukcia valčkového typu ložiska.



Obr. 5) Konštrukcia valčkového ložiska [4]

3.5.1 Výroba valivých teliesok

Valivé telieska alebo elementy rozlišujeme na telieska s bodovým stykom (gulôčky) a telieska s čiarovým stykom (valčeky, ihličky, kuželíky a súdočky). Kvalita valivých teliesok ovplyvňuje vo veľkej miere kvalitu celého zmontovaného ložiska, najmä presnosť chodu a vibrácie, respektíve hlučnosť ložiska. Preto sa pri ich výrobe dbá hlavne o ich geometrickú presnosť [5].

Pri výrobe gulôčok sa používa viacero technologických postupov. Prvým je lisovanie. Polotovarom gulôčky je kúsok drôtu, ktorý sa vloží medzi dve zápustky guľového tvaru. Pri lisovaní sa prebytočný materiál vytlačí a cez celý priemer gulôčky vznikne tenká čiarka, tzv. fleš [5].

Druhou operáciou je tzv. flešing, ktorého úlohou je odstránenie vzniknutého flešu. Pri tejto operácii prechádza guľka viackrát medzi dvoma kotúčmi, z ktorých je jeden pevný a druhý otočný a polomer drážky medzi dvoma kotúčmi je väčší ako polomer guľky. V pevnom kotúči býva výrez, z ktorého guľky vystupujú a po priechode zásobníkom sa zas vracajú späť medzi kotúče. Po tejto operácii nasleduje brúsenie a tepelné spracovanie gulôčok [5].

Poslednou operáciou je brúsenie a lapovanie. Brúsenie a lapovanie majú podobný princíp ako operácia flešing s malými rozdielmi. Pri brúsení a lapovaní sa po určitom čase zábehu vytvorí stav, kedy sa guľka dotýka oboch kotúčov, teda drážka nie je väčšia ako priemer gulôčky. Pri brúsení sa používajú brúsne kotúče z keramických materiálov. Pri lapovaní sa používajú liatinové kotúče a ako brusivo slúži tzv. voľné zrno, ktoré sa privádza sypaním alebo v suspenzii s reznou kvapalinou [5].

Výroba valivých teliesok s čiarovým stykom sa oproti predchádzajúcemu postupu trochu líši. Prvou operáciou je vytvorenie základného tvaru. Bežným polotovarom je tyčka, ktorá sa najprv nareže na jednotlivé telieska a tvárni sa na lisoch, alebo sa priečne rozvalcováva. Väčšie valčeky sa vyrábajú sústružením [5].

Pri druhej operácii sa opracováva plocha plášťa, ktorá prebieha na menších typoch bezhrotových brúsnych strojov. Najprv sa povrch telieska obrúsi na hrubo a potom sa obrúsi na jemno [5].

Ďalšou operáciou je brúsenie čiel valivých teliesok. Brúsenie prebieha na bežných dvojkotúčových brúskach s vodorovnými osami brúsnych kotúčov a podávacieho kotúča. Po obrúsení je každé valivé teliesko automaticky premerané a podľa trendovej krivky nameraných rozmerov sa brúsne kotúče pristavujú [5].

Poslednou operáciou je dokončovanie plášťa a čela telieska [5].

3.5.2 Výroba klieťok

Výroba klieťok valivých ložísk je rôznorodá. Bežne sa klieťky lisujú z ocelového alebo mosadzného plechu a používajú sa v rozmerovo menších až stredných ložiskách. Ich výhodou je nízka hmotnosť a ľahká dostupnosť maziva dovnútra ložiska [5].

Druhým typom sú masívne klieťky, ktoré sa používajú u väčších typov ložísk. Vyrábajú sa sústružením a vŕtaním z ocele, mosadze alebo liatiny [5].

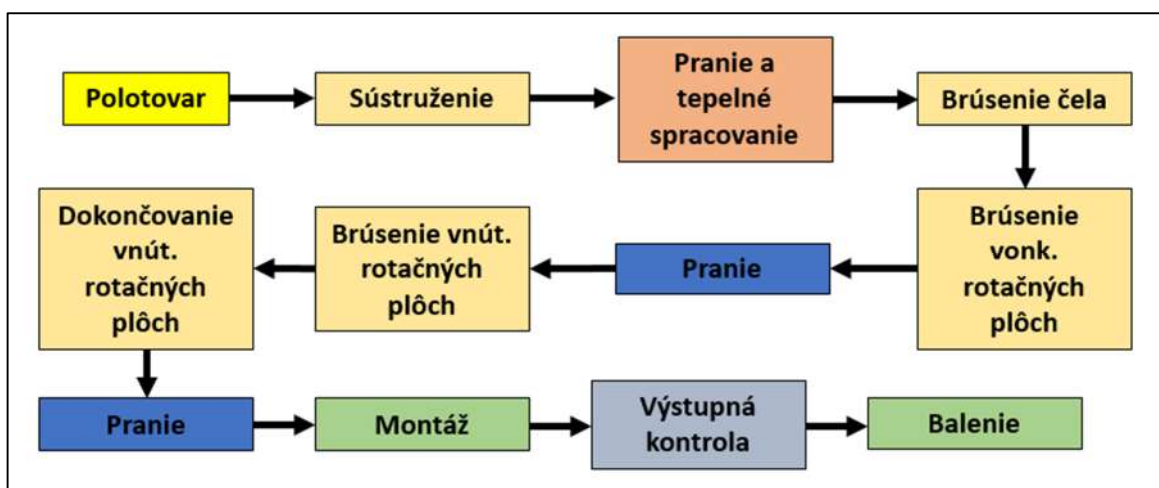
Pri určitých typoch ložísk sa používajú aj plastové klieťky [5].

Kovové materiály sa uplatňujú v prípade, že na klieťky pôsobia zvýšené nároky ako vyššie prevádzkové teploty [5].

Na klieťky nevyplýva priamo záťaž ložiska ale rôzne dynamické sily, najmä odstredivá sila a sily vznikajúce väčším zrýchlením. Klieťka tiež ovplyvňuje mazací proces [5].

3.5.3 Výroba krúžkov

Výroba vonkajších a vnútorných krúžkov začína prijatím polotovaru. Polotovarom môže byť hutný materiál ako rúrka alebo tyč, výkovok, puzdro a pod. Pri voľbe polotovaru treba dbať na celý rad hľadísk ako napríklad stupeň pretvárania ocele, stupeň využitia materiálu a iné. Najčastejšou voľbou polotovaru pre sériovú výrobu valivých ložísk sú rúrky a tyče. Celý proces výroby krúžkov je zobrazený v postupovom diagrame na obrázku č. 6. V ďalších kapitolách je podrobne popísaný proces výroby vonkajších krúžkov, vnútorné krúžky sa vyrábajú podobne [5].



Obr. 6) Postupový diagram výroby krúžkov

Technológiu výroby má každý podnik nastavenú podľa ich vedomostí, možností a skúseností. V malých odchýlkach sa technológia môže líšiť.

3.5.4 Obrobenie na sústružníckych automatoch

V súčasnosti sa obrábajú tyče a rúrky na niekoľkovretenových sústružníckych automatoch. Tieto stroje sú plne automatizované, majú pevný pracovný cyklus a bežne sú ovládané vačkami. Základom stroja je vretenový bubon, kde sú uložené jednotlivé vretená. Po ukončení jedného pracovného cyklu sa bubon pootočí a cyklus sa začína znova. Celý cyklus je riadený centrálnym hriadeľom. Od sústružníckych automatov sa vyžaduje čo najvyššia tuhosť uloženia vretien a vretenového bubnu [5].

V prípade rúrok začína pracovný cyklus delením polotovaru. V prípade tyčí je treba ešte vyvrtáť do tyče diery. Ďalšou operáciou je hrubovanie, nasleduje sústruženie povrchu a obežnej dráhy. Obrobený krúžok smeruje do práčky a následne je tepelne spracovaný [5].

3.5.5 Brúsenie čiel krúžkov

Prvou z brúsnych operácií je brúsenie čela, ktorá je veľmi dôležitá pre ďalší proces výroby. Čelá sa totiž stávajú základňou ďalšej operácie. Medzi základné parametre čela krúžkov patria tolerancia šírky krúžku, rovnobežnosť čiel, rovinnosť a drsnosť [5].

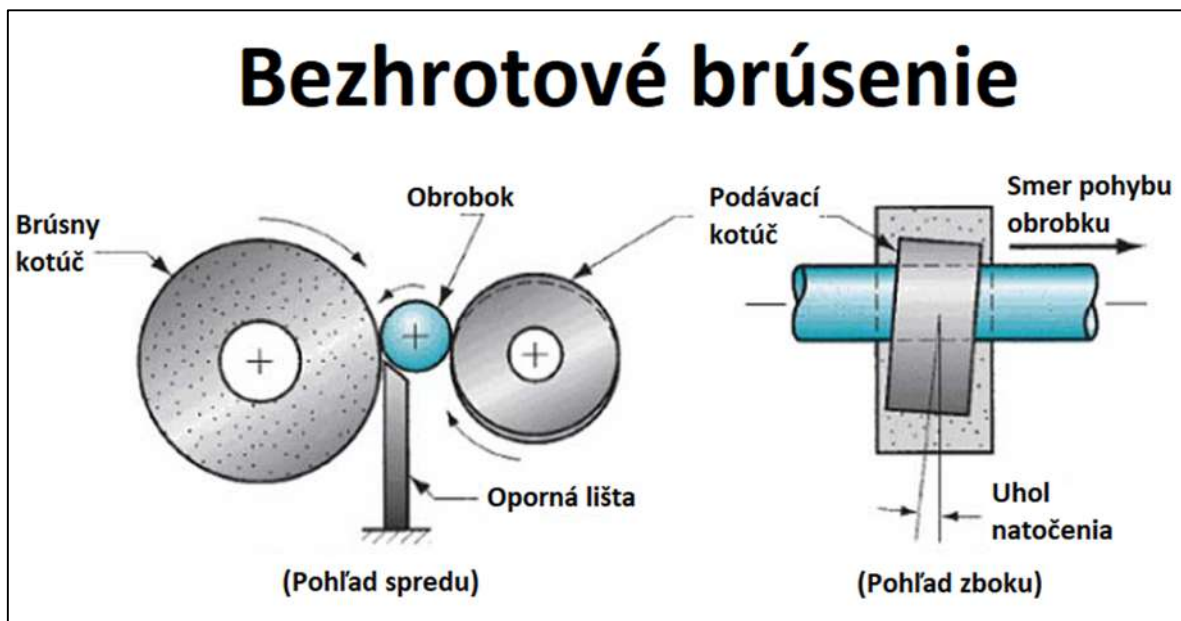
Zakalené krúžky sa vložia do vibračného podávača, ktorý postupne posúva jednotlivé krúžky do dopravníka a ďalej do brúsneho stroja. Brúsny stroj sa skladá z dvoch brúsnych kotúčov a dopravníka, ktorý môže krúžky posúvať buď priamočiaro alebo po kruhovej dráhe. Opotrebovanie brúsneho kotúča sa eliminuje orovnávacím cyklom po určitom množstve nabrúsených dielov. Postupným opotrebením brúsneho kotúča sa zväčšuje brúsna štrbina a preto je na stroji nainštalované meradlo, ktoré zaisťuje požadovaný rozmer vyrobených krúžkov. Podľa nameraných údajov program vypočíta trendovú krivku a pri priblížení sa hraničným zónam prístroj brúsne kotúče pristaví, čím sa brúsna štrbina zmenší [5].

3.5.6 Brúsenie vonkajších rotačných plôch

Obrábajú sa povrchy vonkajších krúžkov a obežné dráhy vnútorných krúžkov. Najpoužívanjšou metódou je technológia bezhrotového brúsenia [5].

Najdôležitejšou podmienkou je vstup krúžkov do stroja. Krúžky musia vytvárať pomyselný stĺpec bez akýchkoľvek medzier, preto je potrebná čo najväčšia priamosť čiel krúžkov. Pri vzniku medzery by mohlo prísť k poškodeniu kvality brúsených dielov, náradia prípadne celého stroja a celý proces by sa musel nastavovať nanovo. Ďalšou podmienkou je geometrické zoradenie stroja, ktoré by malo zabrániť prenášaniu odchýlok tvaru. Poslednou podmienkou je dynamické zoradenie stroja. Treba dbať na poddajnosť stroja a vlastné frekvencie stroja a na otáčky brúsneho kotúča, aby jeho frekvencia bola vzdialená od vlastnej frekvencie stroja [5].

Pracovný proces začína vložением krúžkov do vibračného podávača, ktorým sa postupne dostávajú do brúsneho stroja. Brúsny stroj sa skladá z dvoch kotúčov, podávacieho, ktorý krúžky posúva - otáča, brzdí, dáva im požadovanú rýchlosť, brúsneho kotúča a opornej lišty, na ktorej krúžky ležia. Podávací kotúč je natočený v dvoch uhloch. Vertikálny uhol, spolu s otáčaním podávacieho kotúča, určuje rýchlosť posuvu krúžkov a horizontálnym uhlom sa určuje požadované rozloženie úberu materiálu. Správnym natočením podávacieho kotúča vznikne tvar rotačného hyperboloidu. Opornou lištou sa určuje šírka štrbiny, ktorou krúžok prechádza. Na obrázku č. 7 je zobrazená schéma bezhrotového brúsenia [5].



Obr. 7) Schéma bezhrotového brúsenia [6]

Pri brúsení dochádza k postupnému opotrebovaniu brúsneho kotúča. Preto je brúsny stroj vybavený orovnávacím diamantom. Orovňavací diamant je upevnený na ramienku a postupne orovnáva celú šírku kotúča. Proces orovnania tiež vplýva na obrábaný krúžok, nakoľko sa pri orovnávaní postupne mení priemer brúsneho kotúča, čo vplýva na bod dotyku a obvodovú rýchlosť brúsneho kotúča. Orovňavacím cyklom sa teda brúsny kotúč ostří, profiluje a aj oplachuje od prípadného zanesenia. Preto je dôležitá čistota brúsneho média [5].

V prípade ideálneho krúžku, bez deformácií a odchýlok, vznikne po obrobení dokonale obrúsený krúžok. V skutočnosti však nie je krúžok nikdy dokonale obrobený a jeho kruhový tvar sa mení. Tým sa mení rýchlosť otáčania a posuv, os otáčania a bod dotyku krúžku s brúsnym kotúčom. Tieto okolnosti majú vplyv na vznik vibrácií [5].

Ide o najdôležitejšiu operáciu, pretože povrch krúžkov tvorí referenčnú plochu pre ďalšie operácie. Pri vzniku vlnitosti alebo kruhovitosti je v ďalších operáciách nesmierne náročné až nemožné tieto geometrické odchýlky opraviť [5].

Po tejto operácii smerujú krúžky do práčky.

3.5.7 Brúsenie vnútorných rotačných plôch

Brúsením vnútorných rotačných plôch je myslené brúsenie obežných dráh vonkajších krúžkov a brúsenie dier vnútorných krúžkov. Technológie sú si veľmi podobné, v našom prípade sa budeme zaoberať brúsením vonkajších krúžkov. Pre brúsenie týchto plôch sa používa technológia zápichového brúsenia v roľniach - opierkach. Pri brúsení sa dosahujú hodnoty strednej aritmetickej odchýlky profilu drsnosti R_a od $0,5\mu\text{m}$ do $0,2\mu\text{m}$ [5].

Proces začína vložением krúžkov do vibračného podávača. Ďalej krúžky smerujú dopravníkom, ktorý krúžky správne natočí, až do brúsneho stroja. Brúsny stroj sa skladá z dvoch rolní, spodnej a vrhnej, ktorá vytvára otáčavý pohyb krúžku, klznej opierky a vretena, v ktorom je upnutý brúsny kotúč. Tieto prvky zaručujú dokonalé vystredenie. Pri otáčaní krúžku sa do jeho vnútra vsunie brúsny kotúč, ktorý sa otáča súsledne. Brúsenie má štyri etapy. Prvými tromi sa mení postupne rýchlosť otáčania a úber. Poslednou etapou je vyiskrovanie brúseného povrchu. Týmto postupným brúsením je zaručený rovnomerný úber vzhľadom na kvalitu brúseného povrchu. Po troch výrobných cykloch (záleží od technológie) sa vždy zaháji orovnávací cyklus, ktorého cieľom je naostriť brúsny kotúč, vytvoriť na ňom požadovaný profil a odstrániť prílepené čiastočky [5].

Referenčnou plochou brúsenia je vonkajší povrch krúžku. V prípade zvýšenej kruhovitosti či vlnitosti na referenčnej ploche sa tieto môžu preniesť na obežnú dráhu krúžku, nakoľko brúsny kotúč sa nachádza oproti klznej opierke. Preto po tejto operácii nasleduje kontrolná stanica, ktorá kontroluje každý krúžok. Meranými parametrami sú odchýlka kruhovitosti a rozmerové parametre. Ani v tomto prípade však nemožno vylúčiť chybu spôsobenú ľudským elementom [5].

Pri brúsení predpokladáme s dokonalým náradím. Aj malé vyosenie, či nedodržanie tolerancie či už brúsneho kotúča, vretena alebo roľne môže spôsobiť zvýšené hodnoty geometrických tolerancií. Takéto nepresnosti by ale vyvolali celý rad vadných ložísk, ktoré by celkom rýchlo poukázali na chybu procesu a tieto ložiská by sa nedostali ďalej do výroby. Rovnako predpokladáme čistotu mazacieho média [5].

3.5.8 Dokončovanie vnútorných rotačných plôch

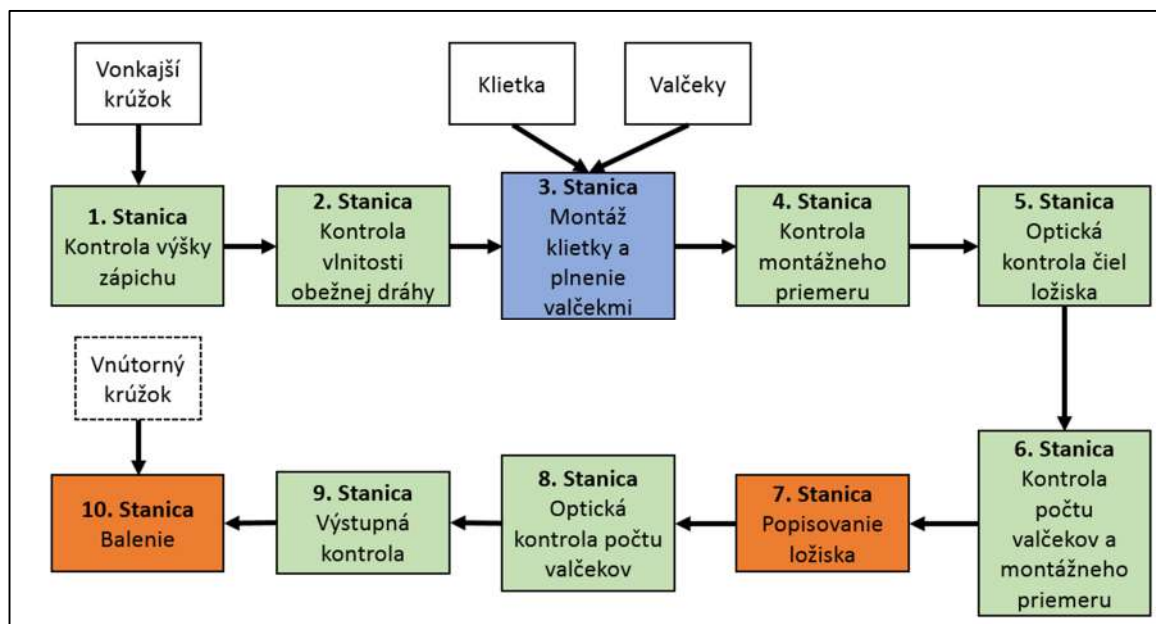
Pri výrobe ložísk sa ako dokončovací proces používa honovanie. Honovanie má podobný princíp ako brúsenie. Pri honovaní sa nepoužíva brúsny kotúč ale honovací kameň, ktorý sa netočí ale posúva po obrábanej ploche. Pri honovaní sa dosahuje drsnosť menej ako $R_a 0,1\mu\text{m}$. Krúžok by sa dal teoreticky vyhladiť úplne dokonale, no malé priehlbinky slúžia ako zásobáreň maziva. Cieľom honovania je menšia vlnitosť a drsnosť povrchu. Hodnoty kruhovitosti alebo tvar profilu sa honovaním odstraňujú veľmi ťažko. Hodnoty vlnitosti a drsnosti súvisia so špecifikáciou brúsneho kameňa a parametrami stroja [5].

Honovací proces nasleduje hneď po predchádzajúcom procese. Dopravníkom sa krúžok dostane z kontrolnej stanice do honovacieho stroja. Honovací stroj pozostáva z dvoch rolní, klznej opierky a mechaniky posunu honovacieho kameňa. Honovací proces má dve etapy. Prvou operáciou je hrubovanie, kde sa orovnajú výstupky povrchu a druhou je dokončovanie, čím sa povrch vyhladí. Honovacia stanica nie je vybavená orovnávacím cyklom, nakoľko sa v tomto type obrábania uplatňuje princíp samoostrenia brúsneho kameňa. Čistota brúsneho média je ale opäť dôležitým parametrom [5].

Po honovaní sa predpokladá, že obežná dráha vonkajších krúžkov spĺňa všetky výrobné požiadavky respektíve požiadavky zákazníka a takýto krúžok smeruje ďalej do práčky, kde sú z neho odstránené všetky nečistoty [5].

3.5.9 Montáž valčkových ložísk

Montážna línia sa skladá z niekoľkých staníc, kontrolných a lisovacích, ktorých cieľom je zložiť ložisko, vyhnúť sa chybám a skontrolovať jeho funkčné parametre. Schéma montážnej línie je zobrazená na obrázku č. 8.



Obr. 8) Postupový diagram montážnej línie ložiska

Prvá stanica slúži na kontrolu výšky zápichu na vonkajšom krúžku. Vibračný podávač správne naorientuje krúžky tak, aby zápich smeroval dole. Keď príde krúžok do kontrolnej pozície, do zápichu sa vsunie náradie, ktoré vždy zaručí rovnakú výšku krúžku. Následne sa vysunú tri dotyky, ktoré zmerajú hodnotu výšky zápichu a taktiež kolmosť zápichu. Pokiaľ niektorá z hodnôt prekročí limitnú hranicu, stroj vyhodnotí krúžok ako závadný a pošle ho podávačom do krabíčky na závadné diely.

Druhou stanicou sa meria vlnitosť obežnej dráhy. Vstupom je skontrolovaný vonkajší krúžok. Krúžok je podávačom roztočený v ose rotácie a následne do neho vnikne snímacia hlava meracieho stroja. Merací stroj je bezdotyková optická hlava, ktorá meria v troch rovinách hodnotu vlnitosti krúžku. Analýzou FFT vyhodnotí graf závislosti amplitúd na frekvencii. Pokiaľ niektorá z amplitúd v niektorom z troch rezov prekročí limitnú krivku, stroj vyhodnotí diel ako závadný a pošle ho podávačom do krabíčky na závadné diely.

Tretia stanica je montážna. Do montáže vstupuje skontrolovaný krúžok, plastová klietka a valčeky. Prvou operáciou sa meria presný priemer obežnej dráhy. Do krúžku vnikne 5-bodový trň, ktorý zmeria hodnotu obežnej dráhy s presnosťou $\pm 0,1 \mu\text{m}$. Pri druhej operácii sa do krúžku vloží klietka a tretia operácia klietku správne nastaví. Štvrtou operáciou sa klietka plní valčekmi. Ich priemer závisí na priemere obežnej dráhy. Pri tejto operácii je možné poškodenie klietky.

Štvrtá stanica slúži na kontrolu montážneho priemeru zmontovaného kompletu. Do ložiska vnikne presný trň, ktorý zmeria presný priemer obalovej kružnice. Obalová kružnica je vnútorná kružnica vpísaná valčekmi, doliehajúcimi na obežnú dráhu vonkajšieho krúžku bez vôle [7]. Pokiaľ vnikne trň príliš hlboko alebo naopak nevnikne, znamená to, že montážny priemer je menší alebo väčší než požaduje zákazník. V takom prípade stroj vyhodnotí ložisko ako závadné a pošle ho podávačom do krabíčky na závadné diely.

Piata stanica je kontrolná. Vstupom je skontrolovaný komplet. Optická kamera nasníma obe strany čela vonkajšieho krúžku, pričom krúžok otočí. V prípade zistenia zábrusu, nečistoty zbytku maziva, alebo iného defektu, vyhodnotí stroj ložisko ako závadné a pošle ho podávačom do krabičky na závadné diely.

Šiesta stanica je kontrolná a skladá sa z viacerých operácií. Prvou operáciou je mechanická kontrola počtu valčekov v kletke. Druhou operáciou je opätovná kontrola montážneho priemeru, tentokrát z druhej strany. Poslednou operáciou je kontrola rotačnej schopnosti ložiska. Podávač posunie ložisko do kontrolnej polohy, kde je ložisko roztočené vretenom. Do ložiska vnikne trň a stroj meria odpor voči otáčaniu. Ak je hodnota odporu príliš vysoká alebo nízka, stroj vyhodnotí ložisko ako závadné. Závadné ložiská sú podávačom presunuté do krabičky na závadné diely.

Siedma stanica je popisovacia. Stroj laserom vyryje na čelo ložiska príslušné označenie.

Ôsma stanica slúži na kontrolu počtu valčekov v prípade, že by šiesta stanica chybu neodhalila. Vstupom je skontrolované ložisko. Ložisko je nasnímané kamerou, ktorá kontroluje počet valčekov. V prípade neprítomnosti valčeka vyhodnotí stroj ložisko ako závadné a pošle ho podávačom do krabičky na závadné diely.

Ložisko sa po tejto operácii dostáva na otočný stôl, z ktorého ho obsluha vkladá do „hlukomeru“. Meranie „hlukomerom“ je popísané samostatne v kapitole 6.4. V prípade zistenia prekročenia akéhokoľvek parametru je ložisko vyhodnotené ako závadné. Obsluha musí toto ložisko vložiť do debničky na závadné diely, ktorá je zabezpečená optickou bránou. V prípade, že tak obsluha neurobí, stroj ďalšie meranie neumožní.

Poslednou stanicou je vizuálna kontrola a balenie. Do ložiska sa vloží, respektíve nevloží vnútorný krúžok, podľa požiadavky zákazníka. Obsluha ložisko vizuálne skontroluje, či sa v ňom nachádzajú všetky valčeky, či sa na ňom nenachádzajú nečistoty alebo iné závady. Nakoniec ložisko zabalí do krabičky zákazníkovi.

4 VIBRÁCIE

Vibrácie sú pojem používaný pre popis kmitania sústavy telies, pričom jednotlivé hmotné body kmitajú, pohybujú sa tam a späť okolo svojej rovnovážnej polohy. Toto kmitanie môže byť spôsobené dynamickým namáhaním stroja, ktoré v značnej miere vplýva na celkovú životnosť stroja. Typickými príkladmi sú nevyváženie rotujúcich častí stroja, veľká vôľa pohybujúcich sa častí stroja, styk plôch alebo technický stav stroja [8,9].

Meranie a vyhodnocovanie vibrácií sa používa vo veľkej miere v údržbe pri stanovení technického stavu objektu, napríklad valivého ložiska [8,9].

Kapitola je rozdelená na dve časti. Prvá časť pojednáva o teórii kmitania. Druhá časť sa venuje typom snímačov a rozličným metódam merania vibrácií.

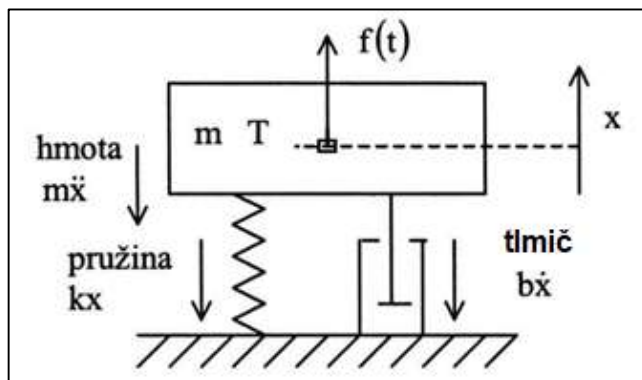
4.1 Základná teória vibrácií

Táto kapitola je venovaná teoretickým znalostiam vibrácií. Opisuje vibrácie na fyzikálnom princípe kmitania hmotného bodu a člení jednotlivé druhy kmitania.

4.1.1 Voľné kmitanie a odozva mechanických systémov na vibrácie

Majme lineárnu mechanickú sústavu. Hmotný bod zavesený na pružine a tlmený tlmičom sa uvedie do kmitavého pohybu buď tým, že na sústavu bude pôsobiť sila vonkajšia alebo zotrvačná alebo sila vyvolaná pohybom dosky, ku ktorej je teleso pripevnené [8,9].

Pohyb mechanických systémov, na ktoré pôsobia vonkajšie sily sa nazýva odozvou systému. Pre jednoduchý popis takého systému je vhodný príklad kmitania s jedným stupňom voľnosti, vid' obrázok č. 9 [8,9].



Obr. 9) Schéma jednoduchého kmitania [10]

Pre tento model platia rovnaké parametre ako pre periodické kmitanie. Pre budiacu silu $f(t)$ platí nasledovný vzťah:

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + kx = f(t), \quad (2)$$

kde: mhmotnosť hmotného bodu,
 btlmenie nehmotného tlmiča,
 ktuhosť nehmotnej pružiny,
 $f(t)$budiaca sila,
 xvýchylka [10].

Pre ľubovoľný priebeh sily budenia $f(t)$, je možné získať hodnotu použitím princípu superpozície, ktorá je veľmi dôležitá pri riešení diferenciálnych rovníc. Superpozícia hovorí, že súčet javov, vyvolaných jednotlivými akciami je výsledkom súčasne pôsobiacich akcií. S využitím princípu superpozície môžeme považovať funkciu $f(t)$ ako súčet nekonečného počtu impulzov o šírke a výške a výslednú hodnotu získať ako súčet odoziev na akcie vyvolané jednotlivými impulzami [8,9].

V reálnom svete sa stretávame so sústavami zloženými z telies, ktoré nie sú dokonale tuhé alebo nehmotné. Zložitosť pohybu skutočných sústav je zapríčinená hlavne pružnosťou telies, ktoré môže v čase meniť svoj tvar a riešenie takýchto sústav je veľakrát ťažké až nemožné. V praxi sa preto stretávame s približnými riešeniami, ktoré s určitou pravdepodobnosťou určujú hodnotu vibrácií [8,9].

4.1.2 Druhy diagnostického signálu

Periodické kmitanie, je charakteristické vratným pohybom telesa okolo vzťažnej polohy s konštantnou periódou. Vzorovým príkladom takéhoto druhu pohybu je harmonický pohyb, napríklad funkcia sínus. Harmonický pohyb je definovaný týmito znakmi:

a) frekvencia kmitania:

$$f = \frac{1}{T}, \quad (3)$$

b) výchylka:

$$x = x_{max} \cdot \sin\left(2\pi \frac{t}{T}\right), \quad (4)$$

c) rýchlosť:

$$v = \frac{dx}{dt}, \quad (5)$$

d) zrýchlenie:

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2}, \quad (6)$$

kde: Tperióda (s),
 x_{max}maximálna výchylka (m),
 tčas (s) [8,9].

Naopak, periodické neharmonické kmitanie sa takýmito znakmi popísať nedá. Pre popis neharmonického deja sa používa metóda frekvenčnej analýzy. Táto metóda vychádza z matematického teorému francúzskeho fyzika Jeana Baptistu Josepha Fouriera, ktorý popisuje periodické deje ako súčet určitého počtu harmonických dejov s rozdielnou amplitúdou a frekvenciou. Príkladom môže byť pohybujúci sa piest [8,9].

V prírode sa často vyskytuje stacionárne náhodné kmitanie. Charakteristickými sú napríklad otrasy spôsobené zemetrasením. Tento signál je charakteristický tým, že sa jednotlivé časti signálu v čase neopakujú a v tom spočíva zložitosť popisu takéhoto signálu. Pre znázornenie priebehu nedeterministického, stacionárneho signálu by bolo nutné poznať jeho

priebeh v minulosti ako aj v budúcnosti. Preto sa využívajú poznatky štatistickej mechaniky [8,9].

Väčšina všetkých náhodných vibrácií, s ktorými sa v reálnom živote stretáme, je však nestacionárna, pretože vlastnosti takéhoto signálu sa v čase menia. Tieto zmeny môžu byť tak pomalé, že tento typ signálu môžeme v danom ohraničenom časovom intervale považovať ako stacionárny [8,9].

4.2 Snímače vibrácií

Pre analyzovanie vibrácií sa používajú snímače vibrácií. Pri voľbe analyzovania treba myslieť na jednotlivé vlastnosti daného snímača. Snímače sa rozdeľujú na aktívne a pasívne.

4.2.1 Vlastnosti a rozdelenie snímačov vibrácií

Všetky stroje v prevádzke sú sprevádzané určitým typom vibrácií. Snímače vibrácií využívajú princíp prevodu kmitania na elektrický signál, ktorý je ďalej spracovaný. Z hľadiska získania signálu sa používa viacero princípov [8,9].

Mechanický princíp využíva pre zväčšenie výchylky svetelný lúč a sústavu zrkadiel [8,9].

Snímače, ktoré využívajú princíp prevodu neelektrickej veličiny na elektrickú, môžu byť aktívne - časť odobratej energie sa premení na elektrickú energiu, a preto nepotrebujú napájanie alebo pasívne - snímač mení parameter podľa meranej veličiny, napríklad odpor. Výhodou týchto snímačov je, že umožňujú prenos signálu na vzdialené miesto, dávajú možnosť zobrazenia a manipulácie so signálom. Hybridné snímače sú ich podmnožinou. Tieto snímače dávajú možnosť zväčšiť vstupný signál, alebo znížiť impedanciu snímača [8,9].

Poslednou kategóriou sú inteligentné snímače, ktoré sú vybavené komplikovanými elektrickými obvodmi s pamäťou a procesorom. Tieto snímače ponúkajú široké spektrum operácií, ako automatické prepínanie rozsahu či kompenzáciu rušivých elementov merania [8,9].

Z pohľadu merania vibrácií sa snímače ďalej rozdeľujú na absolútne, ktoré merajú výchylku voči seizmickej hmote a sú pevne upevnené na stroji a na snímače relatívne, ktoré merajú výchylku voči inej časti objektu, napríklad rámu alebo stojanu [8,9].

4.2.2 Druhy pasívnych snímačov

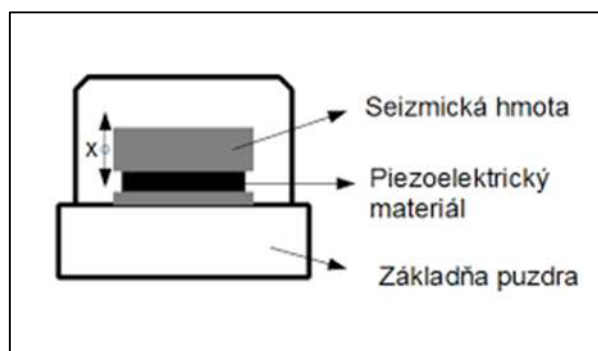
Do tejto kategórie spadajú dva druhy snímačov, a to odporové a kapacitné. Ich výhodou sú malé rozmery, jednoduchosť a široká oblasť využiteľnosti pri vysokých teplotách [8,9].

Odporové snímače využívajú zotrvačnosť seizmickej hmoty, ktorá je upevnená na konci nosníku, votknutého k rámu. Vibráciami sa nosník ohýba a hmota mení svoju vzdialenosť od dvoch elektród, a teda aj odpor [8,9].

Pri kapacitných snímačoch sa využíva zmena kapacity vplyvom zmeny dielektrickej konštanty alebo zmeny prekrytia plochy kondenzátora [8,9].

4.2.3 Druhy aktívnych snímačov

Medzi aktívne snímače patria akcelerometre alebo snímače rýchlosti. Akcelerometre sú najpoužívanejším typom snímačov vibrácií. Ich prednosťami sú vysoká spoľahlivosť, dlhodobá stabilita, široký pracovný rozsah a to, že nepotrebujú napájanie. Ich výstupom môže byť akákoľvek veličina (zrýchlenie, rýchlosť, výchylka). Akcelerometer je seizmické zariadenie, ktoré generuje výstupný signál podľa mechanického pohybu meraného telesa. Princíp akcelerometrov súvisí s piezoelektrickým javom. Vo vnútri snímača sa nachádza piezoelektrický element, ktorý pri namáhaní vytvára náboj, ktorý je priamo úmerný pôsobiacej sile. Snímač môže mať jeden alebo viac piezoelementov. Akcelerometre sa využívajú hlavne pri aplikácii s malými objektami, pri veľkých teplotách alebo silných magnetických poliach. Na obrázku č. 10 je zobrazená schéma piezoelektrického akcelerometra [8,9].



Obr. 10) Schéma piezoelektrického akcelerometra [11]

Snímač rýchlosti alebo elektrodynamický snímač je seizmické zariadenie, ktoré generuje signál napätia úmerne k mechanickému pohybu telesa. Integráciou môžeme na výstupe dostať výchylku vibrácií. Princípom snímača rýchlosti je pohybujúca sa cievka v poli permanentného magnetu. Nevýhodou je nestálosť v magnetickom poli a vysoká hmotnosť [8,9].

4.2.4 Vplyvy pôsobiace na snímače vibrácií

Jedným zo základných vplyvov efektivity snímača vibrácií je jeho spojenie s meraným objektom. Najspoľahlivejším spojením je spojenie snímača a meraného objektu pomocou závrtnej skrutky. Niekedy sa ale táto možnosť použiť nedá a v praxi sa používa spojenie včelím voskom, ktoré je ale náchylné na vyššie teploty, epoxidovým lepidlom, magnetickou úchytkou alebo rukou. Pri pripojení snímača však treba brať na zreteľ prítláčnú silu, ktorá spolu s hmotnosťou snímača znižuje rezonančný kmitočet [8,9].

Ďalším s významných vplyvov je teplota. Pri výrobe piezoelektrických snímačov sa používajú vysoké teploty okolo 500°C. Pri vystavení snímača vyššej teplote prichádza k depolarizácii piezoelementu. Preto sú tieto snímače príslušne označené a pri ich použití je treba tieto snímače chladieť [8,9].

Vplyv kabeľáže má tiež svoj význam. Káble môžu spôsobovať nežiadany šum v prípade, že nie sú usporiadané tak, aby vodiče boli v tesnej blízkosti. Ďalším rizikom je tiež triboelektrický jav, ktorý je spôsobený premennou kapacitou káblov. Tomu sa dá zamedziť pripevnením káblov k objektu, čo najbližšie ku konektoru [8,9].

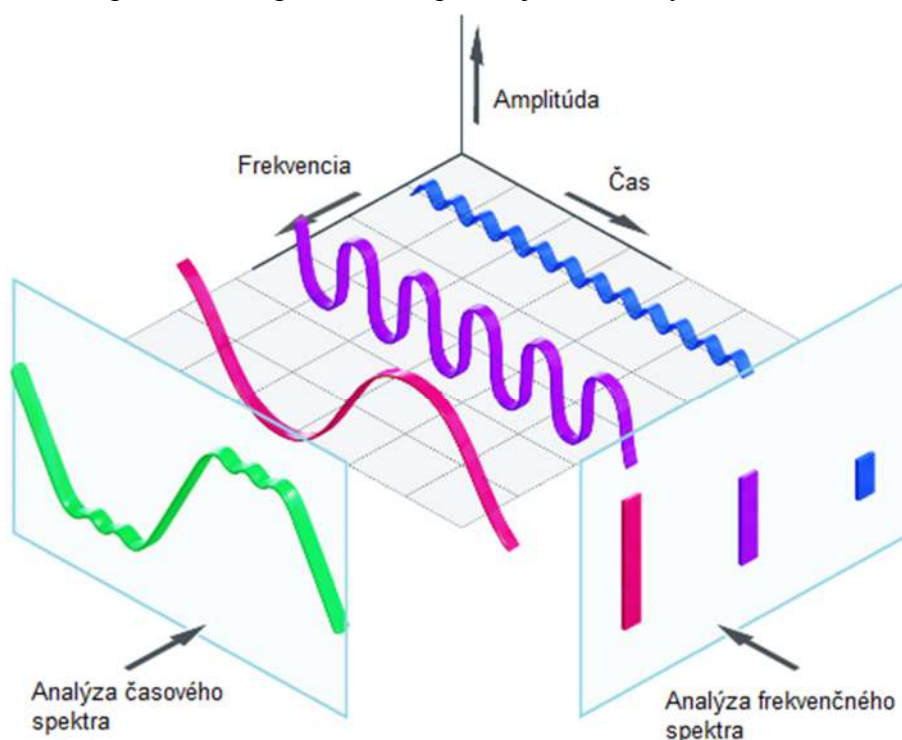
Ostatné vplyvy ako vplyv magnetického poľa alebo rádioaktívneho žiarenia nemajú zásadný vplyv na funkciu piezoelektrického snímača. Pri pôsobení korozívnych látok a vlhkosti treba brať na zreteľ, že sa tieto nesmú dostať k blízkosti konektoru [8,9].

4.3 Základné metódy diagnostiky vibrácií

Vibrácie strojov sú obyčajne spôsobené vnútornými rotujúcimi časťami stroja. Pravidelnosť vibrácií je pevne spätá s technickým stavom stroja a jeho opotrebením. Hlavným nástrojom diagnostiky vibrácií je frekvenčná analýza, ale používajú sa aj iné metódy. Táto kapitola je venovaná len niektorým z týchto metód [10].

4.3.1 Frekvenčná analýza pomocou FFT

Skratka FFT, rýchla Fourierova transformácia, z anglického Fast Fourier Transformation, je analýza priebehu signálu v časovej oblasti. Posudzovanie časového priebehu signálu je sprevádzané rozkladom signálu na súbor elementárnych funkcií, najčastejšie sa používa rozklad na súbor harmonických funkcií s rozdielnou amplitúdou, uhlovou frekvenciou a fázou. Tento rozklad na tzv. Fourierovu radu sa týka najmä periodických alebo kvaziperiodických signálov. Fourierov rad má nekonečný počet členov, a preto sa používajú len zložky, ktoré sú násobkami základnej frekvencie opakovania signálu. Princíp FFT je zobrazený na obrázku č. 11 [10,12].

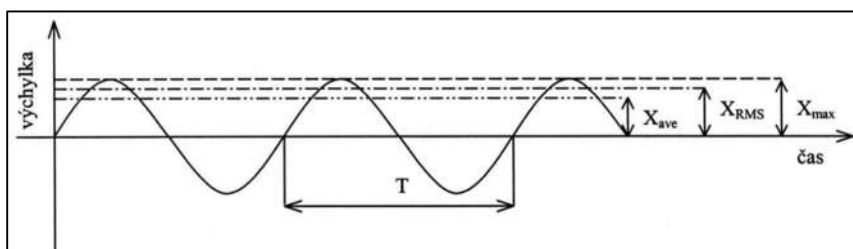


Obr. 11) Princíp rozkladu signálu vibrácií [13]

Frekvenčné spektrum časového signálu zobrazuje závislosť medzi amplitúdou a frekvenciou. Tento nástroj dáva možnosť identifikovať technický stav meraného objektu, prípadne postupné zhoršovanie jednotlivých komponentov objektu [10,12].

Meranie vibrácií je vlastne vyjadrenie amplitúdy signálu funkcie sínus, vid' obrázok č. 12. Pre meranie celkových vibrácií sa najviac používajú tieto parametre:

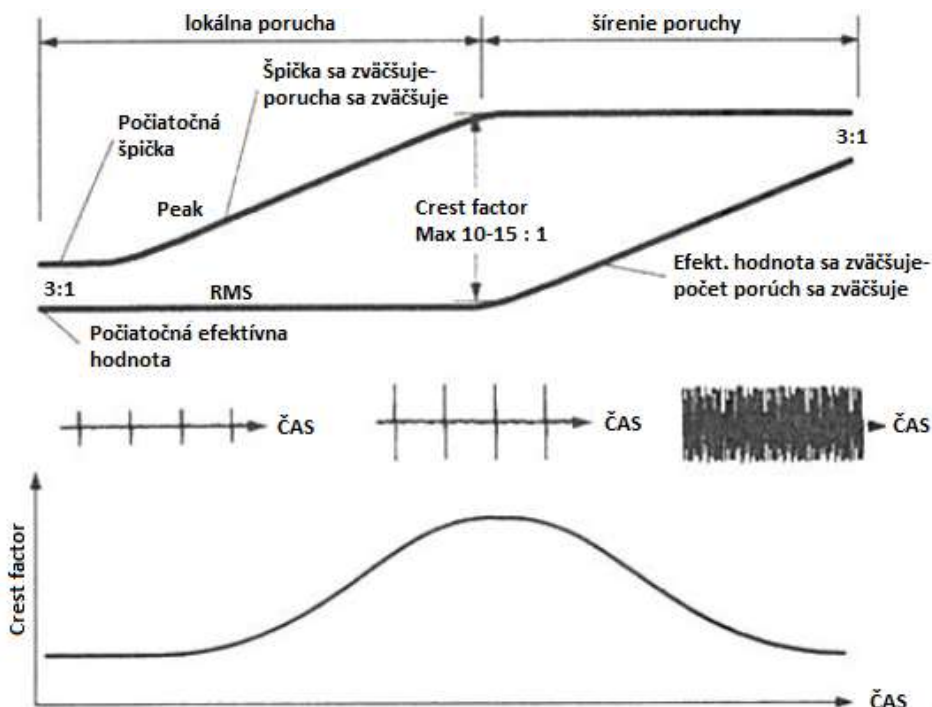
- špička: vzdialenosť medzi nulovou hladinou a vrcholom vlny,
- špička-špička: vzdialenosť medzi najnižším a najvyšším vrcholom vlny,
- priemerná hodnota (Average),
- efektívna hodnota RMS: RMS, druhá odmocnina štvorcov, je najdôležitejším parametrom, nakoľko nesie dôležitú informáciu o časovom priebehu vibrácií [10,12].



Obr. 12) Parametre periodického signálu [10]

4.3.2 Crest faktor

Crest faktor, alebo činiteľ výkmitu, amplitúdy, ukazuje závislosť medzi špičkovou a efektívnou hodnotou. Metóda je veľmi užitočná, dokáže zachytiť malé poškodenie objektu pri zachovaní RMS. Pri vyššom poškodení zasa Crest faktor klesá a RMS stúpa. Na obrázku č. 13 je zobrazená schéma princípu metódy Crest faktor [14].



Obr. 13) Princíp metódy Crest faktor [14]

4.3.3 Metóda K(t)

Metóda je založená na podobnom princípe ako crest faktor, pri jej použití však možno dospieť k lepším výsledkom. Používa sa najmä pre diagnostiku ložísk. Pre výpočet platí vzťah:

$$K(t) = \frac{a_{pp(0)} \cdot a_{ef(0)}}{a_{pp(t)} \cdot a_{ef(t)}}$$

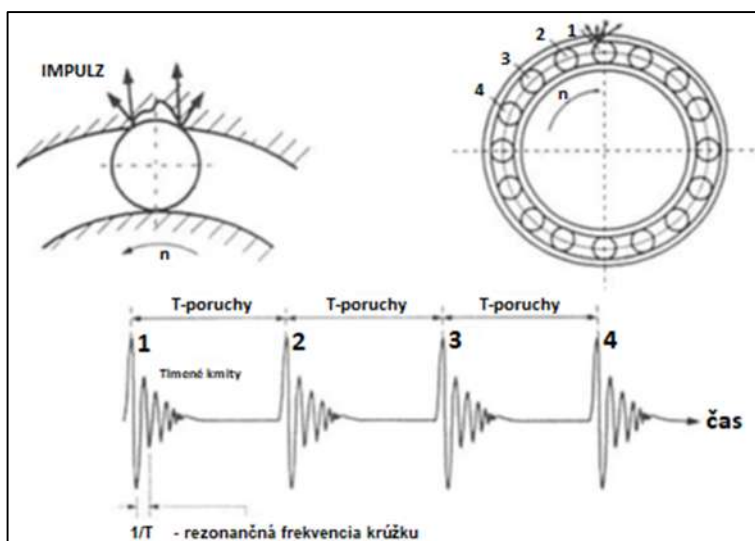
kde: a_{pp}špičková hodnota zrýchlenia (m/s^2),
 a_{ef}efektívna hodnota zrýchlenia(m/s^2),
 (0).....východzia hodnota v čase 0 (s),
 (t).....okamžitá hodnota v čase t (s) [10].

Na základe výsledku je stanovená diagnóza:

- a) $K(t) = (0 - 0,02)$, ložisko je v havarijnom stave,
- b) $K(t) = (0,02 - 0,2)$, ložisko je v poruchovom stave,
- c) $K(t) = (0,2 - 1,0)$, ložisko je v bezporuchovom stave [10].

4.3.4 Obáľková analýza

Táto metóda sa používa pri hodnotení technického stavu objektov s veľkými otáčkami. Pre toto kritérium sú vhodné ložiská a ozubené súkolia, ktorých signál má malú amplitúdu, ale veľmi vysoké frekvencie. V prípade poruchy ložiska na obežnej dráhe vyvolá vibráciu každý jeden valivý element, vid' obrázok č. 14. Porucha sa potom prejavuje vznikom sledu ostrých impulzov s malou kinetickou energiou. Tento signál sa ale pri bežnom meraní stratí v šume alebo v otáčkových frekvenciách [14].



Obr. 14) Princíp obáľkovej analýzy [14]

4.3.5 Metóda SPM

Metóda Shock Pulse Method je založená na snímaní krátkodobých tlakových vĺn, ktoré sú vyvolané mechanickými rázmi. Tieto rázy vznikajú na základe drsnosti obežných dráh alebo valivých elementov ložísk. Rázové impulzy sa snímajú v rozmedzí 30-40 kHz. Snímajú sa dve úrovne, prahová a špičková, ktoré sa zakresľujú do grafu a pri prekročení hraničnej hodnoty je ložisko závadné [10].

5 HLUČNOST

Hlučnost, alebo hluk, je ďalším z fenoménov spoľahlivosti strojných zariadení. Je pevne spätá s kmitaním častí stroja, vibráciami, ktoré ju vyvolávajú. Meraním hlučnosti sa dá stanoviť opotrebenie častí stroja, kvalita zariadenia, prevádzkové podmienky alebo zaťaženie [15].

Hlučnost ale tiež súvisí s ľudským elementom. Človek vníma hluk ako negatívny a nepríjemný sluchový vnem. Vystavenie človeka nadmernému hluku môže viesť k ťažkým zdravotným problémom, v niektorých prípadoch môže hluk spôsobiť stratu sluchu. Fyziológia ľudí sa ale veľmi líši a každý človek vníma hluk inak, preto je hluk z hľadiska ľudského elementu vnímaný ako subjektívny prvok. K určeniu jeho objektivity slúžia rôzne metódy [15].

Táto práca sa venuje fenoménu hlučnosti ako počuteľnému dôkazu kmitania sústavy. Hlučnosti, ako škodlivému elementu, ktorý má nepriaznivý akustický vplyv na človeka a jeho okolie, sa práca nevenuje [15].

Kapitola je venovaná teórii hlučnosti, rozličným parametrom, ktorými môže byť hlučnost meraná a konkrétne hlučnosti ložísk.

5.1 Charakteristika hluku

Hluk je zvuk, ktorý je pre človeka nežiaduci, pretože ho vníma ako nepríjemný a rušivý element. Tento zvuk vzniká vibráciami v konštrukcii stroja. Takéto vibrácie budeme označovať ako mechanické kmitanie v rozsahu počuteľných frekvencií. Zvukové vlnenie nastane, keď má teleso alebo časť telesa väčšie rozmery ako je asi polovica dĺžky vlny. Pri pôsobení rázových vĺn vznikajú vibrácie, ktoré sa šíria od zdroja zvuku do konštrukcie. Pri šírení zvuku v pevnej časti konštrukcie telesa je určitá časť utlmená, no ďalšia časť vibrácií predáva svoju energiu vzduchu, a tak dochádza k vyžarovaniu hluku. Tento hluk sa môže ďalej šíriť prostredím, alebo môže byť odrazený od iného povrchu alebo ďalej tlmený [15].

Hluk môžeme rozdeliť do troch oblastí. Do prvej oblasti patria zdroje hluku a hodnotenie akustického účinku. Druhou oblasťou je cesta šírenia hluku medzi zdrojom a prijímačom hluku a treťou oblasťou je spôsob vnímania hluku. Pre technické použitie sú dôležité prvé dve oblasti [15].

5.1.1 Vznik hluku a jeho zdroje

Za zdroj hluku sa dá považovať akýkoľvek objekt, v blízkosti ktorého vzniká akustická energia, ktorá sa ďalej šíri do prostredia objektu. V praxi sa stretávame s dvoma typmi zdrojov hluku [15].

Prvým typom sú chvejúce sa povrchy strojov, ich komponentov, stien a pod. Akustická energia sa šíri od zdroja vibrácií prostredím. Vibrácie môžu byť spôsobené napríklad nevyváženosťou rotujúcich častí, nadmerným trením alebo nežiaducimi nárazmi [15].

Druhým typom vzniku hluku je neustálené prúdenie tekutín. V tomto prípade sú zdrojom hluku najmä miesta, kde prebiehajú najvýznamnejšie zmeny rýchlosti prúdenia alebo objemu. Typickým príkladom je ventilátor [15].

V praxi sa ale často vyskytujú oba zdroje naraz. Príkladom môže byť elektromotor. Hluk vytvára točiaci sa ventilátor, nevyváženosť rotoru, trenie v ložiskách a iné [15].

5.2 Základné veličiny zvuku

Zvuk sa v prostredí šíri ako vlnenie, ktorého smer a šírenie určuje zvukový lúč, kolmý k vlnoploche. Akustické vlnenie sa prejavuje zmenami niektorých veličín, ktoré určujú stav prostredia. Jedná sa najmä o kmitanie častíc prostredia okolo rovnovážnej polohy, zmena tlaku alebo vnútorného napätia, postupné prenášanie rozruchu a pod. Tieto veličiny súvisia s miestom merania v priestore, čase, akustickou intenzitou atď. Typickým príkladom, určujúcim hodnotu týchto veličín je funkcia sínus. V skutočnosti má hluk zložitejší priebeh, pretože v ňom pôsobí súčasne viacero kmitov s rôznymi amplitúdami a frekvenciami [15].

5.2.1 Akustický tlak

Akustický tlak má charakter vlnenia a naznačuje striedavé hodnoty odchýlky od rovnovážnej polohy barometrického tlaku. Táto zmena pôsobí na sluchový orgán alebo na meracie zariadenie. Akustické tlaky majú obyčajne veľmi nízku hodnotu v porovnaní s barometrickým tlakom. Je pevne spätý s akustickou rýchlosťou a akustickou výchylkou, ktoré ho charakterizujú. Zväčša sa meria v Pascaloch [15].

5.2.2 Akustická rýchlosť

Charakterizuje rýchlosť kmitania pohybujúcich sa častíc okolo rovnovážnej polohy. Najčastejšie sa udáva jej efektívna hodnota a vyjadruje sa v metroch za sekundu [15].

5.2.3 Rýchlosť zvuku

Rýchlosť šírenia zvuku c , vyjadruje vzdialenosť, ktorou urazí rozruch od zdroja zvuku za jednu sekundu v smere šírenia zvuku. Je to charakteristická, konštantná veličina pre plyny a iné materiály, ktorá sa mení s teplotou. Pre vzduch s teplotou $T=20^{\circ}\text{C}$ má hodnota rýchlosti šírenia zvuku hodnotu $c=343\text{ m/s}$ [15].

5.2.4 Vlnová dĺžka

V diagnostike hluku vyjadruje vlnová dĺžka vzdialenosť, kedy má hodnota akustického tlaku v čase rovnakú veľkosť. Ide vlastne o vzdialenosť jedného kmitu. Označuje sa znamienkom λ a jej hodnota sa udáva v metroch [15].

$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad (7)$$

kde: crýchlosť zvuku (m/s),
 ffrekvencia (Hz) [15].

5.2.5 Vlnová rovnica

Priebeh spojený s akustickými dejmi popisuje najlepšie v priestore aj čase vlnová rovnica. Riešenie takejto rovnice má význam pre základné teoretické výpočty, no v technickej praxi sa používajú odvodené vzťahy [15].

5.2.6 Intenzita zvuku

Intenzita zvuku poskytuje podrobnejšie informácie o povahe akustického výkonu zdroja zvuku. Akustická energia je rozložená na vlnoplochách, ktorými postupuje. Časť energie, ktorá sa šíri postupnými vlnami plochou 1m^2 kolmo k šíreniu zvuku za jednotku času, sa nazýva intenzita zvuku. Vyjadruje sa vo Wattoch/ m^2 [15].

5.2.7 Akustický výkon

Na rozdiel od intenzity zvuku, kedy sa uvažuje šírenie akustickej energie cez plochu jedného štvorcového metra sa akustický výkon viaže k ľubovoľnej ploche. Môžeme tak celý povrch vlnoplochy spojiť so súčtom intenzity zvuku na tejto vlnoploche a určíme tak akustický výkon. Vyjadruje sa vo Wattoch a najčastejšie závisí od plochy a priemernej intenzity zvuku [15].

Akustickým výkonom je možné definovať každý zdroj hluku v porovnaní s akustickým tlakom. Výhodou je, že nie je potrebná hodnota vzdialenosti do zdroja hluku, orientácia, vlastnosti prostredia a pod [15].

5.3 Zdroje hluku

Zdroje hluku prenášajú do okolia akustický výkon šírený prostredím. Z fyzikálneho hľadiska je najjednoduchším prípadom šírenie akustického výkonu všetkými smermi. Tento model sa ale vyskytuje len u veľmi malého počtu zdrojov hluku. V technickej praxi sa najviac stretávame so šírením hluku charakteristického uložením zdroja na rovinnej ploche, napríklad podlahe alebo pracovnom stole. Tento model ovplyvňuje akustický výkon aj jeho smerové vlastnosti. Zdroj hluku nemusí vyžarovať celý objekt, pri veľkých objektoch stačí jeho časť, alebo môže byť zdrojom hluku viacero. Tiež je treba brať na zreteľ vzdialenosť od zdroja hluku [15].

Zdrojmi hluku môžu byť napríklad dopravné prostriedky, piestové alebo prúdové stroje, v ktorých sa hluk vytvára prúdením tekutín, elektrické stroje alebo časti strojov, ako sú ozubené súkolia a ložiská [15].

Keďže sa táto práca venuje práve ložiskám, podrobnejšie je popísaný len vznik hluku valivých ložísk.

5.3.1 Hluk valivých ložísk

Valivé ložiská sú v mnohých strojných zariadeniach význačným zdrojom hluku. Príčinou je najmä presnosť výrobných strojov, ktorá má zásadný vplyv na odchýlky obežných dráh a valivých teliesok od ideálneho tvaru. Tieto nepresnosti majú za následok nerovnomerné pohyby v ložisku a vytvorené vibrácie sa ďalej posúvajú do celej konštrukcie strojného zariadenia. Ďalšími príčinami hluku valivých ložísk je sklz, dynamická nevyváženosť valivých teliesok alebo sily, ktoré pôsobia na ložisko. Najčastejšími strojnými zariadeniami, u ktorých sa hluk prejavuje sú elektrické motory, vodné čerpadlá alebo vretenové stroje [15].

Vo frekvenčnom spektre hluku valivých ložísk vznikajú typické frekvenčné zložky. Pre výpočet týchto frekvencií je nutné poznať vzťahy medzi otáčkami a rozmermi jednotlivých komponentov valivého ložiska. Pomocou výpočtu týchto hodnôt môžeme dospieť k jednotlivým frekvenciám. Všetky vzorce sú uvedené v kapitole 6.2.1 - Vlastné frekvencie komponentov ložísk [15].

Frekvenčné spektrum hluku valivého ložiska má spojitý charakter. Z frekvenčnej oblasti vyniká oblasť medzi 50 do 10 000 Hz, v ktorých sa uplatňujú náhodné nepravidelnosti obežných dráh a valivých elementov, vzniknuté pri výrobe. Táto frekvenčná oblasť je v celkovom spektre hluku najdôležitejšia, na dosiahnuté hladiny má najväčší vplyv obvodová rýchlosť krúžku [15, 16].

Celkovo teda na hlučnosť ložísk vplývajú tieto skupiny oblastí:

- a) nesúososť obežnej dráhy vnútorného krúžku s obežnou dráhou vonkajšieho krúžku - spôsobuje radiálne alebo axiálne hádzanie,
- b) nesúososť obežnej dráhy vnútorného krúžku s vonkajším povrchom krúžku,
- c) deformácia obežných dráh krúžkov, ktoré môžu byť s pravidelnými alebo nepravidelnými hranami,
- d) vlnitosť obežných dráh krúžkov, čo môže byť spôsobené kmitaním brúsneho stroja - môže byť vylepšené dokončovacími operáciami,
- e) drsnosť povrchu obežných dráh - závisí na konečnom obrábaní povrchu,
- f) kruhovitosť valivých teliesok [15].

Z toho vyplýva, že vplyv konštruktéra na hlučnosť ložísk je minimálny. Ložiskové podpory by mali byť z materiálu s vyšším tlmením vibrácií. Hlučnosť valivých ložísk závisí od kvality výroby, správnosti montáže ložísk a kvality povrchu, do ktorého je ložisko vlisované [15].

Z pohľadu hlučnosti ako počuteľného elementu sa môžu jednotlivé poruchy tiež rozlíšiť. Veľká radiálna vôľa sa prejavuje silným hrčivým tónom. Pri väčšej axiálnej sile sa tento hluk môže zmenšiť [15].

Ak ložisko hučí vysokým tónom, upozorňuje to na prítomnosť nečistôt pri vysokom otáčaní alebo na malú vôľu pri nižších otáčkach. Príčina hluku je, že sa ložisko nemôže dostatočne rýchlo točiť a dochádza k preklzavaniu [15].

Ostrý hluk vzniká deformáciou obežných dráh ložísk, údermi valivých teliesok do krúžka [15].

Pískavý zvuk je spôsobený príliš voľným uložením vnútorného krúžku, ktorý sa voľne pohybuje a chveje. Toto môže byť spôsobené napríklad hrubým obrobením krúžku. Vibrovaním ložiska sa odrú vrcholky nahrubo obrobenej plochy, a tým sa celková radiálna vôľa zmení. Obežné dráhy je preto veľmi dôležité obrábať s presnými toleranciami, ktoré sa dajú dosiahnuť len dokonale zvládnutou technológiou výroby ložísk [15].

Pri usadzovaní ložiska je treba brať na zreteľ optimálne uloženie ložiska. Príliš pevné upevnenie prenáša zvukové vlny do konštrukcie strojného zariadenia, uloženie s veľkou vôľou zasa zvyšuje hrkot ložiska [15].

Pri lisovaní je zas treba dávať pozor na prítláčnú silu. Na ložisko by nemala pôsobiť nárazová ale tlaková sila. Pri nutnosti použitia kladiva sa používa medzikus, ktorý rozloží úder kladiva na celú plochu ložiska [15].

5.4 Metódy merania hluku

V technickej praxi sa častokrát vyžadujú informácie o hlučnosti zdrojov hluku, ktorými môžu byť strojné zariadenia alebo ich časti. Tieto údaje slúžia na informovanie zákazníka ako dôkaz, že boli splnené stanovené podmienky určené obchodnou zmluvou. Pre jednotnosť, jednoduchosť a reprodukovateľnosť týchto meraní boli vydané normy určené práve na meranie hlučnosti [15].

Jednou z možností je meranie hluku vzhľadom na akustický tlak a hladinu akustického výkonu. Tieto merania sa vykonávajú napríklad vo voľnom zvukovom poli, vo vzdialenosti 1 meter a pod. Je pri nich veľmi dôležité, aby podmienky merania spĺňali normu a aby sa v okolí nenachádzali žiadne rušivé elementy, ktoré by mohli spôsobiť nepresnosť merania [15].

Druhou možnosťou je meranie vibrácií zariadení. Tieto merania sa vykonávajú práve preto, aby bola určená ich životnosť, alebo aby neprišlo k havarijnému stavu strojného zariadenia. Vibrácia, respektíve kmitanie je tiež jedným z parametrom kvality výrobku [15].

5.4.1 Technológia AEE

Je vysoko použiteľná pri detekcii poruchy ložísk alebo ozubených súkolí, pretože disponuje veľmi včasnou detekciou pomocou merania akustickej emisie generovanej opotrebením. Touto metódou je možné odhaliť prvé známky poškodenia ložiska. Častými príčinami vzniku akustickej emisie sú napr. defekty ložísk, mazanie alebo trenie ložiska [15].

6 METÓDY MERANIA VIBRÁCIÍ A HLUČNOSTI LOŽÍSK

Ako už bolo spomenuté, ložiská sú jedným z kritických komponentov stroja a v prípade ich poruchy môžu spôsobiť fatálne škody stroja. Poruchy sa môžu na ložisku vyskytnúť už vo fáze výroby alebo počas prevádzky ložiska. Práve preto je dôležité monitorovanie stavu ložísk [17].

Pre hodnotenie kvality ložísk sa používa niekoľko metód. Môžeme ich rozdeliť na metódy merania vibrácií a hlučnosti, metódy merania teploty a analýzy opotrebenia. V technickej praxi sa najviac používajú metódy merania vibrácií a hlučnosti [17].

Na meranie vibrácií a hlučnosti poznáme viacero technologických postupov ako napríklad FFT analýza, metóda Shock Pulse, meranie tlaku zvuku a merania akustických emisií [17].

Kapitola je venovaná vzniku hlučnosti a vibrácií v ložisku a možnosťou ich analyzovania.

6.1 Vznik hlučnosti a vibrácií v ložisku

Ložiská sa správajú ako zdroj vibrácií a hluku kvôli ich premenlivej poddajnosti a prítomnosti nepresností. Radiálne ložiská vytvárajú vibrácie, aj keď sú všetky ich komponenty geometricky perfektné. Spôsobuje to konečný počet valivých elementov, ktoré prenášajú záťaž. Pri otáčaní ložiska sa neustále mení ich pozícia v danom mieste záťaže, čo spôsobuje periodické zmeny celkovej tuhosti sústavy. Táto zmena tuhosti je jedným zo zdrojov vibrácií [17].

Najväčší vplyv na vibrácie a hlučnosť majú poruchy ložiska. Tieto môžeme rozdeliť na lokálne a plošné, rozložené po celom obvode ložiska [17].

Medzi plošné poruchy radíme drsnosť a vlnitosť povrchu, nepriamosť obežných dráh a neštandardnú veľkosť valivých elementov. Tieto chyby vznikajú už pri nesprávnej výrobe ložiska, montáži alebo abrazívnym opotrebením. Premennivosť styku valivých elementov s obežnou dráhou spôsobuje vznik vibrácií [17].

Lokálne poruchy zahŕňajú trhliny, jamky a odlupovanie čiastočiek z obežných dráh. Najväčším zdrojom týchto porúch je únava materiálu. Pod povrchom sa vytvorí malá únavová trhlina, ktorá sa šíri smerom k povrchu, až pokiaľ sa od povrchu neoddelí malá čiastočka. Únavová porucha môže byť spôsobená preťažením alebo nárazom pri prevádzke alebo montáži. Keď sa poškodený komponent ložiska interakciou stretne s druhým komponentom, vyvolá tento stret zmenu vo vibračnej odozve, ktorá môže byť snímačom zachytená [17].

6.2 Meranie frekvenčným prístupom

Meranie pomocou frekvenčného spektra je najrozšírenejším prístupom meraní technického stavu ložísk. Pri meraní sa používa analýza FFT, ktorá značne zefektívňuje a zľahčuje celú analýzu. Pri meraní stavu ložísk sú dôležité aj nižšie aj vyššie frekvenčné pásma [17].

Interakcia porúch ložísk vytvára krátke impulzy vždy, keď príde k vzájomnému dotyku komponentu s poruchou s neporušeným komponentom. Tieto impulzy budia vlastné frekvencie valivých teliesok, krúžkov alebo krytu a zvyšujú vibrácie najmä vo vyšších frekvenciách, preto je dôležité sledovať práve tieto pásma. Pre každý komponent ložiska je špecifická iná vlastná

frekvencia. V prípade poruchy na danom komponente sa v analýze môže objaviť práve vlastná frekvencia daného komponentu [17].

6.2.1 Vlastné frekvencie komponentov ložísk

Tieto frekvencie sú vypočítané analyticky podľa kinematiky valivých ložísk. Frekvencia otáčania kletky:

$$f_{kl} = \frac{1}{2} f_r (1 - \gamma), \quad (8)$$

frekvencia vyvolaná poruchou na obežnej dráhe vonkajšieho krúžku:

$$f_{po} = \frac{1}{2} z f_r (1 - \gamma), \quad (9)$$

frekvencia vyvolaná poruchou na obežnej dráhe vnútorného krúžku:

$$f_{po} = \frac{1}{2} z f_r (1 + \gamma), \quad (10)$$

frekvencia vyvolaná poruchou na povrchu valivého telieska:

$$f_{po} = \frac{D}{d} z f_r (1 - \gamma^2), \quad (11)$$

kde: f_rrelatívna frekvencia otáčania (Hz),

zpočet valivých teliesok (-),

γkoeficient zohľadňujúci stykový uhol (-),

dpriemer valivého telieska (mm),

Dstredný priemer ložiska (mm) [17].

Mimo týchto frekvencií existujú ešte ďalšie ako napríklad frekvencia vyvolaná radiálnym hádzaním:

$$f_{ro} = f_r = \frac{n}{60}, \quad (12)$$

kde: nfrekvencia otáčania (min^{-1}).

Frekvencia vyvolaná oválnosťou obežnej dráhy vnútorného krúžku:

$$f_{ov} = 2f_r \text{ [17]}. \quad (13)$$

6.3 Meranie vibrácií podľa normy ISO 15242

Medzinárodná norma ISO 15242 špecifikuje metódy merania vibrácií pre radiálne ložiská jednoradové alebo dvojradové [16].

6.3.1 Frekvencia otáčania

Základná hodnota otáčok posudzovaného ložiska by mala byť 1800 otáčok pre ložiská s vonkajším priemerom do 100 mm. Pre väčšie ložiská do 200 mm by otáčky mali byť 900 otáčok za minútu. Tolerancia otáčania by mala byť $+1\%$ -2% [16].

Iné otáčky môžu byť použité po dohode medzi výrobcom a zákazníkom. Pre veľmi malé ložiská je niekedy nutné použiť vyššie otáčky, ako povoľuje norma, aby výsledný signál bol adekvátny. Pre veľmi veľké ložiská sa zasa používajú nižšie otáčky, pretože vyššie otáčky môžu spôsobiť poškodenie obežnej dráhy alebo valivých teliesok [16].

6.3.2 Zaťaženie ložiska

Pri meraní by mali byť radiálne ložiská zaťažené radiálnou silou. Hodnota sily je učená tabuľkou č.1 [16]:

Tab 1) Tabuľka štandardných hodnôt radiálneho zaťaženia podľa normy ISO 15242

Vonkajší priemer ložiska D		Jednoradové radiálne valivé ložiská		Dvojradové radiálne valivé ložiská	
		Štandardné hodnoty radiálneho zaťaženia pre ložiská			
>	≤	min.	max.	min.	max.
mm		N		N	
30	50	135	165	165	195
50	70	165	195	225	275
70	100	225	275	315	385
100	140	315	385	430	520
140	170	430	520	565	685
170	200	565	685	720	880

Iná hodnota zaťaženia môže byť použitá po dohode medzi výrobcom a zákazníkom. Hodnota zaťaženia závisí od dizajnu, frekvencie otáčania a použitého maziva. V určitých prípadoch treba použiť väčšie zaťaženie, aby sa zabránilo preklzavaniu alebo menšie zaťaženie, aby sa zabránilo možnému poškodeniu ložiska [16].

Pre axiálne ložiská by hodnota zaťaženia nemala prekročiť hodnotu 30 N [16].

6.3.3 Meranie a vyhodnocovanie

Štandardnou fyzikálnou veličinou pri meraní vibrácií ložísk je hodnota RMS, kapitola 4.3.1 - Frekvenčná analýza pomocou FFT[16].

Detekcia vrcholových hodnôt a pulzov v časovej oblasti, najmä pri výskyte povrchových nedokonalostí alebo znečistení ložiska, môže byť považovaná ako doplňujúca možnosť. Pre tieto merania existujú rôzne postupy [16].

Pre meranie vo frekvenčnom spektre sa používa meranie rýchlosti vibrácií. Analyzuje sa jedno alebo viac pásiem, ktoré sú charakterizované frekvenčným intervalom. Štandardné hodnoty pásiem sú uvedené v tabuľke č.2 [16].

Tab 2) Tabuľka štandardných frekvenčných pásiem podľa normy ISO 15242

Otáčky vretena			Nízke pásmo (L)		Stredné pásmo (M)		Vysoké pásmo (H)	
			Nominálne pásmové frekvencie					
nominál.	min.	max.	$f_{dolná}$	$f_{horná}$	$f_{dolná}$	$f_{horná}$	$f_{dolná}$	$f_{horná}$
min ⁻¹			Hz		Hz		Hz	
900	882	909	25	150	150	900	900	5000
1800	1764	1818	50	300	300	1800	1800	10000

Iné frekvenčné intervaly môžu byť použité po dohode medzi výrobcom a zákazníkom v tých prípadoch, keď špecifické intervaly majú väčší vplyv na funkciu ložísk [16].

Prípadná zmena otáčok vyžaduje adekvátnu zmenu frekvenčných intervalov, hraničných hodnôt a času merania [16].

Pri meraní radiálnych jednoradových alebo dvojradových ložísk je dôležité nastaviť zaťaženie v radiálnom smere na stojaci krúžok kolmo na os vnútorného krúžku. Axiálne zaťaženie je nevyhnutné pri meraní axiálnych ložísk. Prítlak na axiálne ložiská je vždy len z jednej strany na netočiacy sa krúžok [16].

Pre diagnostické účely sa odporúča opakovať meranie so zmenou natočenia netočiaceho sa krúžku vzhľadom k meraciemu dotyku [16].

6.3.4 Podmienky merania

Prvou podmienkou je stav mazania ložísk. Premazané ložiská by sa mali merať v rovnakom stave ako boli doručené. Zvláštny dôraz by sa mal klásť na nepremazané ložiská, pretože kontaminácia ložísk by mohla spôsobiť zvýšenie vibrácií, ložiská by mali byť úplne čisté. Nepremazané ložiská by sa mali adekvátne namazať mazivom na to určeným. Pre homogénne premazanie je pred meraním doporučené pretočenie krúžkov nanečisto [16].

Vreteno, vrátane trňa, na ktorom sa točí merané ložisko, by malo byť skonštruované tak, aby okrem prenosu krútiaceho momentu reprezentovalo pevný referenčný systém. Prenos vibrácií medzi vretenom respektíve trňom a ložiskom vo frekvenčnom pásme by mal byť zanedbateľný v porovnaní s nameranými hodnotami [16].

Povrch trňa, na ktorom je upevnené analyzované ložisko, by malo mať toleranciu priemeru triedy f5, s minimálnymi geometrickými odchýlkami, aby bolo zaručené ľahké klzanie ložiska [16].

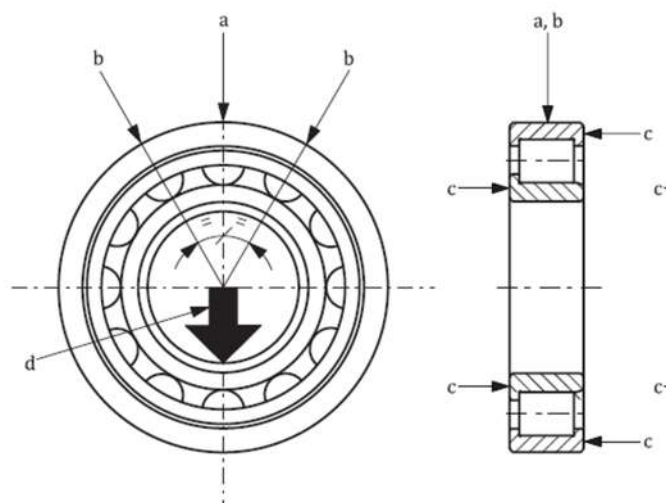
Prítláčny systém by mal byť skonštruovaný tak, aby sa merané ložisko mohlo v určitých medziach pohybovať a vibrovať vo všetkých smeroch tak dlho, ako si to vyžaduje dĺžka merania [16].

6.3.5 Rozsah a smerovanie prítlačnej sily

Na merané ložisko, respektíve netočiacy sa krúžok, by mala byť vyvíjaná konštantná radiálna sila, spolu s doporučeným axiálnym prítlakom. Štandardne sa používajú prítlačné ramená. Výslednica pôsobenia prítlačnej sily na ložisko musí prechádzať osou rotácie a smerovať kolmo dole [16].

Deformácia krúžkov, spôsobená kontaktom s mechanickou jednotkou, by mala byť v porovnaní s geometrickou presnosťou analyzovaného ložiska zanedbateľná [16].

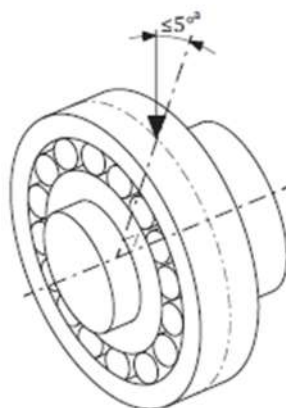
Pozícia radiálneho zaťaženia by mala byť v strede šírky vonkajšieho krúžku. Smer zaťaženia by mal byť v osi kolmej na os otáčania. Správna pozícia a smer sú viditeľné na obrázku č. 15 [16].



Obr. 15) Poloha snímača a zaťaženia (a- pozícia snímača, b- pozícia prítlaku, c- axiálna opierka, d- výslednica síl) [16]

6.3.6 Pozícia snímača

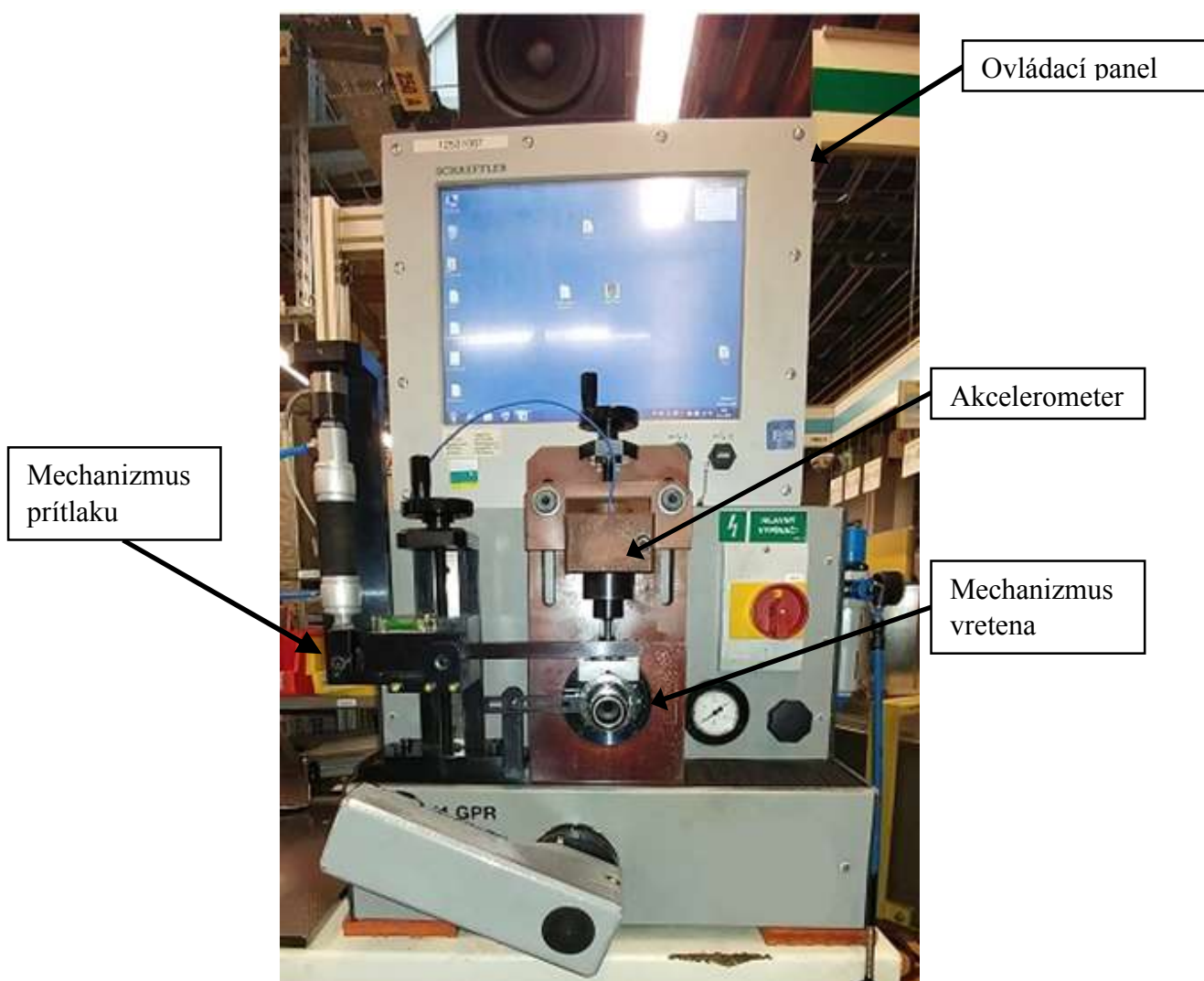
Štandardne by mala hlava snímača smerovať kolmo do osi rotácie a mala by byť umiestnená v strede medzi dvoma bodmi prítlačnej sily. Náčrt možno vidieť na obrázku č. 16. Maximálna odchýlka nahnutia snímača je $\pm 5^\circ$ [16].



Obr. 16) Tolerancia naklopenia snímača [16]

6.4 Meranie vibrácií v podniku

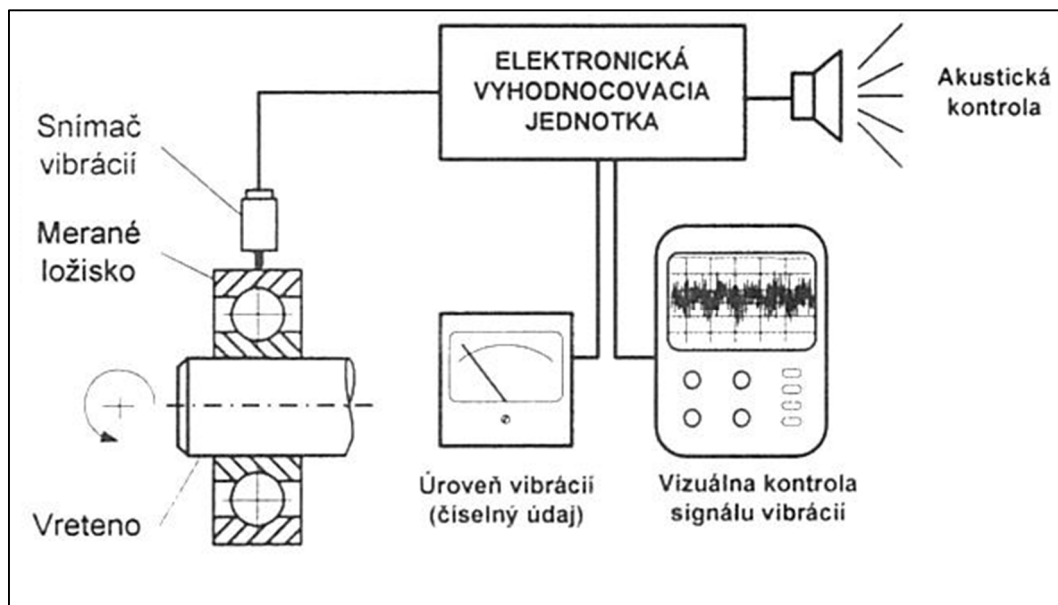
Pre meranie „hlučnosti“ zmontovaného ložiska sa používa „hlukomer“, ktorý si podnik sám zostavil. „Hlukomer“ je vlastne nesprávny názov zariadenia, pretože upevnený snímač meria vibrácie ložiska. Toto označenie sa používa z toho dôvodu, že medzi týmito javmi existuje vysoká korelácia. Kontrola „hlučnosti“ je poslednou operáciou montážneho procesu ložiska. Slúži na zachytenie chybných ložísk, ktoré prešli všetkými ostatnými kontrolami, od kontroly rozmerov po kontrolu vlnitosti a taktiež dáva výslednú charakteristiku zmontovaného ložiska. Na obrázku č. 17 je fotografia „hlukomeru“ so stručným popisom častí „hlukomeru“, ktorý sa používa vo výrobe [18].



Obr. 17) „Hlukomer“ používaný v podniku

6.4.1 Princíp funkcie „hlukomeru“

Snímačom je piezoelektrický akcelerometer. Pri meraní snímacia hlava prijíma kmitanie točiaceho sa ložiska. Tento signál je elektronickou vyhodnocovacou jednotkou ďalej spracovaný a rozdelený do troch úrovní. Prvá úroveň vyhodnotenia vyhodnocuje úroveň vibrácií ako číselný údaj. Druhá úroveň vyhodnotenia spracuje a vykreslí priebeh frekvencií nameraného signálu. Tretia úroveň spracuje nameraný signál a matematickým prepočtom vytvorí zvukový záznam. Všetky úrovne sa dejú súčasne. Schéma takéhoto merania je zobrazená na obrázku č. 18 [18].



Obr. 18) Schéma funkcie „hlukomeru“ [18]

Spracovaný signál sa zobrazí na vyhodnocovacej jednotke, ku ktorej je pripojený monitor. Obrazovka monitora je rozdelená na viacero polí, vid' obrázok č. 19. Prvé pole je pre pracovníka najdôležitejšie. Udáva celkový stav ložiska. Po skončení merania ložiska prístroj vyhodnotí ložisko ako vyhovujúce alebo nevyhovujúce. V tomto poli je tiež zobrazená sila prítlaku a časť premodulovania - charakteristika snímača [18].

V druhom poli je zobrazená rýchlosť otáčania vretena. Slúži na reguláciu a kontrolu otáčania [18].

V treťom poli je zobrazené DMP spektrum analyzovaného signálu. DMP spektrum zobrazuje periodické frekvencie signálov typické pre ložiská. Tieto frekvencie sa vyskytujú na krúžkoch so špecifickou chybou na vnútornom krúžku, vonkajšom krúžku alebo valivom teliesku a sú dané geometriou ložiska. Jednou z výhod použitia DMP spektra je jeho využiteľnosť v množstve frekvencií. DMP spektrum odfiltruje neperiodické frekvencie a zanechá len periodické. Nevýhodou je potrebný dlhší čas merania. Do DMP spektra je možné vložiť tolerančné polia podľa vypočítaných frekvencií. Pomocou týchto tolerančných polí sa dajú identifikovať rôzne poruchy analyzovaných ložísk [18].

Vo štvrtom poli je zobrazené originálne spektrum nameraného signálu. Do originálneho spektra je rovnako možné vložiť tolerančné polia. Pozícia a hodnota týchto tolerančných polí je určená experimentálne, podľa skúseností [18].

V poli číslo 5 sú zobrazené 3 pásma úrovně vibrácií, nízke stredné a vysoké pásmo. Hodnota týchto pásiem je daná normou [18].

V poslednom, šiestom poli sú zobrazené namerané hodnoty troch veličín a to vrcholovej hodnoty signálu, efektívnej hodnoty signálu a ich pomeru, hodnoty parametra Crest faktor [18].



Obr. 19) Príklad vyhodnotenia hlučnosti

Poslednou úlohou vyhodnocovacej jednotky je odfiltrovanie impulzov, čo sú vlastne nárazy v hlukových signáloch. Tieto nárazové impulzy sú spôsobené mechanickými alebo elektronickými vplyvmi okolia. Odstránenie impulzov umožňuje spoľahlivú kontrolu hlučnosti aj pri výskyte takýchto nárazov. Výhodou tohto procesu je odstránenie pseudo-nepodarkov, nevýhodou je dlhší čas merania [18].

Pri bežnej prevádzke zariadenia pracovník vizuálne skontroluje náradie zariadenia, nastaví program, respektíve typorozmer vyrábaného ložiska a prístroj si sám vypočíta všetky parametre podľa geometrie ložiska a programu. Vložením referenčného dielu sa skontroluje správny chod zariadenia. Takéto zariadenie je pripravené na meranie [18].

6.4.2 Snímacia hlava

Snímaciu hlavu tvorí piezoelektrický akcelerometer. Telo akcelerometra je z titánu a piezoelement je keramický. Dôležité vlastnosti akcelerometra sú uvedené v tabuľke č. 3 [19].

Tab 3) Parametre akcelerometra

Citlivosť	10,2mV/(m/s ²) ±10%
Frekvenčný rozsah	0,5 – 10 000 Hz ±5%
Nelinearita	≤ 1%
Materiál snímača	Keramika
Materiál krytu	Titán
Veľkosť	11,2mm x 22,4mm
Hmotnosť	5,8 g

Pri meraní vibrácií je najdôležitejšie miesto styku valivého ložiska a dotyku snímača. Poloha dotyku snímača by mala byť presne nastavená kolmo k ose otáčania v strede šírky vonkajšieho krúžku ložiska. Tolerancia uhlovej nesúososti je maximálne 3° a paralelnej nesúososti je maximálne 0,025mm [18].

6.4.3 Mechanika radiálneho prítaku

Mechanika prítaku je tvorená viacerými časťami, ktoré zaisťujú jej presnosť. Prítlačnú silu vytvára plynový vak, ktorý sa pri naplnení zväčší, no jeho dĺžka sa zmenší. Tým zdvihne ramienko, ktoré na druhom konci pomocou páky tlačí na otáčajúci sa krúžok. Na konci ramienka je pripevnený doraz tak, aby boli splnené všetky podmienky normy. Tento doraz sa dotýka ložiska v dvoch bodoch tak, aby výslednica síl smerovala kolmo dole a prechádzala osou otáčania. Ramienko je vybavené vodováhou, ktorá zaručuje jeho rovnobežnosť [18].

6.4.4 Otáčky vretena

Vreteno sa otáča konštantnou rýchlosťou 1800 otáčok za minútu. Do vretena je vložený tŕň, na ktorom sú nalisované dva vnútorné krúžky. Meranie prebieha na zadnom krúžku, prvý krúžok slúži na pretočenie nanečisto a na ľahké vloženie ložiska. Meraním sa krúžok opotrebováva, ale len do takej miery, ktorá neovplyvní výslednú hlučnosť ložiska. Po každej zmene sa vnútorný krúžok z tŕňa vyberie, vyhodí a vlisuje sa nový [18].

7 ANALYZOVANIE SIGNÁLU

Hlavnou úlohou tejto práce bolo nájsť parameter, ktorým by sa dala identifikovať vada. Ako už bolo skôr zmienené, zákazníkovi bola odoslaná zákazka ložísk, ktoré sa montujú do prevodovky. Zákazník ložíská prijal, vlišoval do prevodovky, no pri kontrole celej zostavy zistil zvýšené hodnoty hlučnosti. Po analýze nameraného signálu zistil, že príčinou hlučnosti sú práve ložíská.

Zákazník evidoval tri druhy ložísk. V prvej skupine sa vyskytovali ložíská, ktoré nevykazovali zvýšené hodnoty hlučnosti. Druhá skupina ložísk vykazovala hraničné hodnoty hlučnosti ložísk. Zákazník tieto ložíská akceptoval, ale žiadal o nápravu a analýzu vady. Po premeraní ložísk v podniku sa zistila zvýšená hodnota kruhovitosti a vlnitosti na valčekoch.

Tretia skupina ložísk vykazovala výrazné prekročenie hodnoty hlučnosti a zákazník tieto ložíská reklamoval. Ložíská boli poslané naspäť do podniku a po premeraní „hlukomerom“ boli rovnako zistené prekročené hodnoty „hlučnosti“ ložísk. Meracie spektrum je rozdelené na niekoľko tolerančných polí, z ktorých je možné zistiť príčinu zvýšenej „hlučnosti“. Zvýšená hlučnosť tolerančného poľa, ktorým sa meraná skupina ložísk vykazovala, však nemalo presne stanovenú príčinu.

Ložisko sa skladá z viacerých komponentov. Najprv teda bolo treba zistiť, či sa daná vada nachádza na jednom z valčiek, kletke alebo vnútornom respektíve vonkajšom krúžku. Pri meraní hlučnosti sme najprv skúsili viacero vnútorných krúžkov, no pri ich výmene sa hodnota hlučnosti neznížila. Nasledovala kontrola kletky a valčiek. Pri ich výmene sme postupovali nesmierne opatrne, aby sme nepoškodili obežnú dráhu vonkajších krúžkov. No ani výmenou valčiek a kletky sa hodnota „hlučnosti“ výrazne nezmenila a ložíská stále vykazovali prekročenie hlučnosti 14. tolerančného poľa frekvenčného spektra tak, ako je vidieť na obrázku č. 20. Týmto sa zistilo, že príčinou sú práve vonkajšie krúžky.



Obr. 20) Vyhodnotenie chyby ložísk na 14. tolerančnom poli

Presnosť vonkajších krúžkov je daná rozmermi a geometrickými toleranciami. Rozmery sú zaistené presnou výrobou a sú kontrolované niekoľkými stanicami. Je skoro nemožné, aby sa zákazníkovi dostalo ložisko s nepresným rozmerom, samozrejme, je treba vždy zohľadniť vplyv ľudského činiteľa. Preto sme sa zamerali práve na geometrické tolerancie obežnej dráhy krúžku. Na obrázku č. 21 je model vonkajšieho krúžku ložiska.



Obr. 21) *Model vonkajšieho krúžku ložiska [20]*

Výkres ložiska, uvedený v prílohe č. 1, stanovuje geometrické tolerancie ložiska a zameriava sa na kruhovitosť, vlnitosť a drsnosť povrchu. V podniku sa pri uvoľnení zákazky skontrolujú vždy všetky tieto parametre a keď spadajú do tolerancie, zákazka môže ísť na montážnu líniu. Podľa doterajších informácií sme usúdili, že zmienená vada krúžku môže byť spôsobená kruhovitosťou. Preto sme pozbierali 5 ložísk bez hlučnosti a 5 hlučných ložísk a tieto sme analyzovali s cieľom nájsť parameter, ktorý by vyradil závadné ložiská.

Najprv sme ložiská opatrne rozobrali, očistili a adekvátne označili. Následne boli ložiská premerané v podniku a druhým krokom boli premerané v Českom metrologickom inštitúte v Brne. Prvou úlohou bolo zistiť a potvrdiť presnosť merania v podniku. Druhou bolo už spomínané hľadanie parametra, ktorým by sme boli schopní triediť bezchybné a chybné krúžky.

7.1 Geometrické tolerancie ložísk

Základné parametre ložísk udáva katalóg ložísk, ktorý disponuje širokým spektrom rôznych druhov ložísk. Pri špecifických objednávkach sú tieto stanovené dohodou zákazníka a výrobcu a sú uvedené na výkrese súčiastky [1].

Prvou skupinou týchto parametrov sú presné rozmery šírky, vonkajších a vnútorných priemerov spolu s ich toleranciami. V súčasnosti sú strojné zariadenia na takej úrovni a sú vybavené takými kontrolami, že je takmer vylúčené vyrobiť ložisko s nesprávnym rozmerom a nedetegovať ho [1].

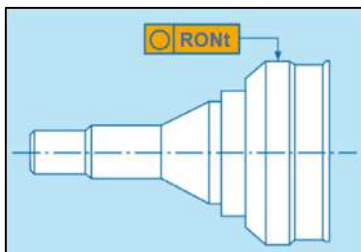
Druhou skupinou sú geometrické tolerancie ložísk. Medzi najdôležitejšie patrí kruhovitosť, vlnitosť a drsnosť. Keďže valivé telieska sa odvalujú po obežných dráhach, merajú sa tieto parametre len na obežných dráhach [1].

Meraním parametrov bolo zistené, že dôležitým povrchom nie sú iba tie, ale rovnako aj nefunkčné plochy, najmä vonkajší povrch u vonkajšieho krúžku.

7.1.1 Kruhovitost

Geometrická tolerancia kruhovitost' patrí medzi základné tolerancie tvaru, rovnako ako priamosť, rovinnosť či valcovitosť. Ako tolerancia tvaru sa neviaže k žiadnej základni [21].

Kružnica je podľa definície množina všetkých bodov roviny, ktoré majú od stredu kružnice danú konštantnú vzdialenosť, polomer kružnice. Kruhovitost' je vlastnosťou kružnice. Daná je tolerančným poľom, ktoré vymedzuje v priereze dve sústredné kružnice s rozdielnym polomerom. Príklad kruhovitosti je na obrázku č. 22 [21].



Obr. 22) Označenie kruhovitosti[21]

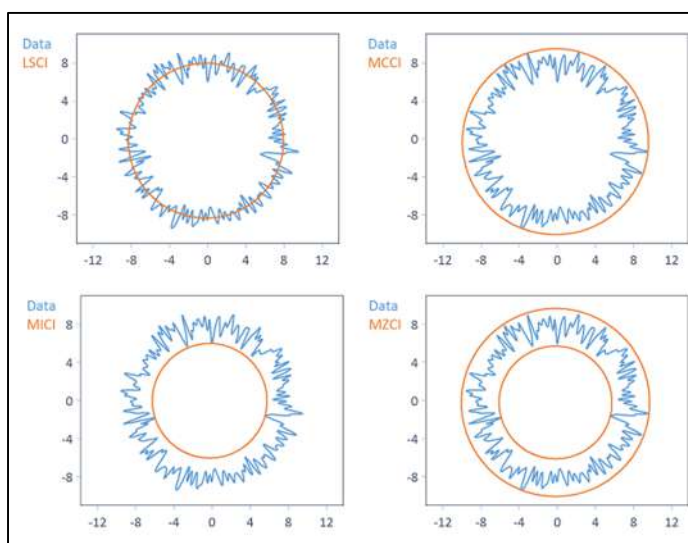
Pri meraní kruhovitosti je dôležité nastaviť dva parametre a to referenčnú kružnicu a filter [21].

Poznáme 4 druhy referenčných kružníc, ku každej sa viaže konkrétna norma. Prvou je referenčná kružnica minimálnej zóny, v ktorej dve sústredné kružnice ohraničujú profil kruhovitosti a sú rozmiestnené v najmenšej radiálnej vzdialenosti. Používaná skratka je **MZCI** - Minimum Zone Reference Circles [21].

Druhým typom je referenčná kružnica najmenších štvorcov, skratka **LSCI** - Least Squares Reference Circle. Označuje kružnicu, pre ktorú je súčet štvorcov odchýlok kruhovitosti najmenší [21].

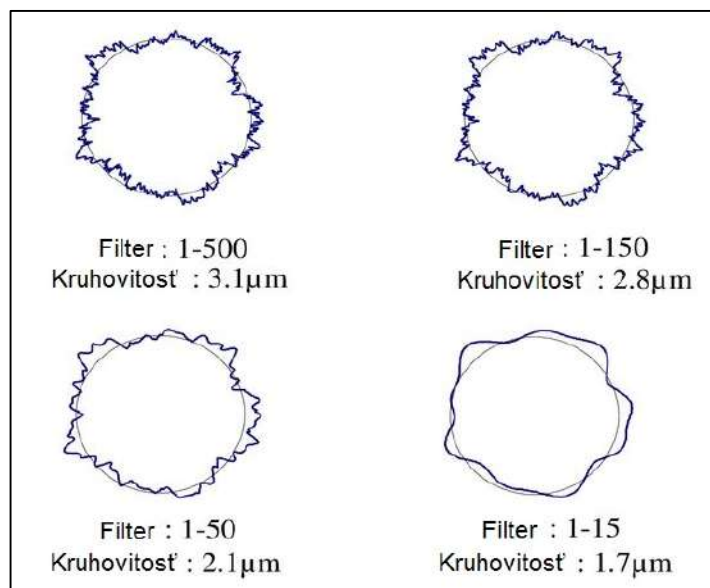
Poslednými dvomi referenčnými kružnicami sú minimálne opísaná a maximálne vpísaná. Minimálne opísaná - **MCCI** je najmenšia možná kružnica, ktorá môže byť umiestnená okolo profilu kruhovitosti. Maximálne vpísaná - **MICI** je najväčšia možná kružnica, ktorá môže byť umiestnená do vnútra profilu kruhovitosti [21].

Na obrázku č. 23 sú uvedené všetky typy referenčných kružníc.



Obr. 23) Typy referenčných kružníc[22]

Filtrovaním sa nastavuje obvod referenčnej kružnice daný počtom sínusových vlnení obsiahnutých v profile kruhovitosti - **UPR**, pásmo sínusového vlnenia profilu, ktoré je prenášané väčším percentom filtra, stanovanými hodnotami horného a dolného vlnenia cut-off. Na obrázku č. 23 je príklad zobrazenia filtrovania kruhovitosti [21].



Obr. 24) Vplyv filtrácie [23]

Princípom merania kruhovitosti je zistiť vzdialenosť odchýlok skutočného povrchu od ideálneho kruhu. Podľa druhu odchýlok rozdeľujeme 4 parametre:

- **RON_t** - hodnota najväčšej kladnej odchýlky kruhovitosti k absolútnej hodnote najväčšej zápornej odchýlky kruhovitosti,
- **RON_p** - hodnota najväčšej kladnej odchýlky kruhovitosti od referenčnej kružnice LSCI,
- **RON_v** - absolútna hodnota najväčšej zápornej odchýlky kruhovitosti od referenčnej kružnice LSCI,
- **RON_q** - druhá odmocnina súčtu štvorcov odchýlok kruhovitosti od referenčnej kružnice LSCI [21].

7.1.2 Obvodová vlnitosť

Obvodová vlnitosť je tesne spätá s kruhovitosťou. Je to približne periodicky sa opakujúca geometrická odchýlka tvaru. Tolerancia vlnitosti sa posudzuje vzhľadom k ideálnej kružnici. Vplyvom filtrácie sa ale z nameraného profilu odstráni kruhovitosť a zostane len profil vlnitosti. Vlnitosť má obdobné parametre ako kruhovitosť [24].

Vlnitosť je negatívnym prvkom pri meraní vibrácií ložísk. Efektívne sa odstraňuje dokončovacími operáciami ako je napríklad honovanie [24].

7.2 Meranie v podniku

Prvým krokom bolo nazbieranie ložísk. Postupným meraním sme získali 5 ložísk so zvýšenou hodnotou hlučnosti na 14. tolerančnom poli a pre porovnanie 5 bezchybných ložísk. Z ložísk boli opatrne vybrané valčeky a krúžky boli riadne označené a premerané.

7.2.1 Merací ostrovček

Merací ostrovček, stanovisko, je malé laboratórium, ktoré slúži na kontrolu pri uvoľňovaní zákaziek. Toto stanovisko disponuje viacerými metrologickými zariadeniami, ako sú kruhomer, profilomer a drsnomer. Pri uvoľňovaní zákazky sa obsluha riadi pokynmi z výroby a tiež výkresom súčasti, kde sú uvedené všetky tolerancie.

V prípade merania vonkajších krúžkov sa začína meraním tolerancie profilu obežnej dráhy. Podľa predpísanej tolerancie sa zmeria polomer zaoblenia obežnej dráhy, tzv. bombína. Meranie prebieha v jednej rovine.

Ďalšou operáciou je meranie drsnosti profilu cez šírku obežnej dráhy. Týmto meraním sa získa informácia o obrobení obežnej dráhy. Meranie prebieha v jednej rovine.

Poslednou operáciou je meranie na kruhomere. Merací ostrovček disponuje dvoma typmi kruhomerov. Prvým typom je kruhomer Talyrond 131 od firmy Taylor-Hobson. Tento absolútny kruhomer je vybavený presným vretenom, ktoré roztáča stolček a dotykový snímač, ktorý sníma výchylku kruhovitosti. Podmienkou tohto merania je dokonalé vycentrovanie súčastky, čo sa vykonáva pomocou štyroch skrutiek umiestnených okolo stolčeka, ktorými sa natáča hlavica vretena. Stolček je vybavený skľučovadlom, ktoré zaisťuje jeho vystredenie. Pri meraní sa otáča meraný objekt. Po splnení týchto kritérií sa vykoná meranie a program zobrazí protokol o meraní, v ktorom je vykreslený graf a hodnoty kruhovitosti, vlnitosti a analýza RTA.

Druhým typom je kruhomer MUK-F 300 PC od firmy Aquastyl, ktorý má jeden zásadný rozdiel. Pri meraní sa neotáča meraný objekt, ale snímací dotyk. Dôležitou podmienkou je opäť vystredenie, ktoré sa vykonáva mechanicky, no centrovanie sa vykonáva softwarovo, takže toto meranie je presnejšie. Pri porovnaní týchto dvoch metód bol však výsledok merania takmer zhodný.

7.2.2 RTA analýza

Analýza RTA sa používa pre hodnotenie povrchových nerovností na kruhových profiloch. V podnikoch vyrábajúcich presné kruhové diely, napríklad komponenty ložísk, je to veľmi použiteľná metóda. Zahŕňa v sebe prvky merania kruhovitosti aj vlnitosti meranej súčastky [24].

Meranie prebieha úplne rovnako ako meranie kruhovitosti či vlnitosti. Po premeraní všetkých bodov program spracuje nameraný signál a vynesie graf závislosti amplitúdy na počte nameraných vln - UPR. Namerané hodnoty sa podľa hraničnej krivky vyhodnocujú ako akceptovateľné alebo neakceptovateľné odchýlky [24].

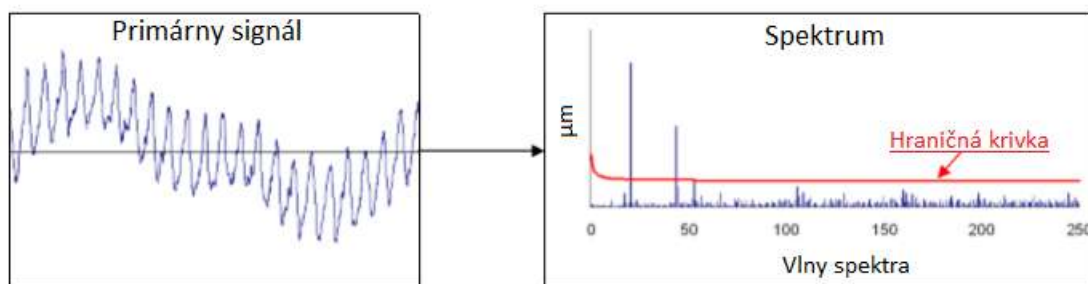
Hraničná krivka predstavuje exponenciálnu funkciu, ktorá je daná rovnicami 14 a 15:

$$s_w = \frac{R_w}{(w-1)^n}, \quad (14)$$

$$n = n_0 + \frac{k}{w}, \quad (15)$$

kde: s_w amplitúda vlny spektrálnej analýzy,
 R_w prípustná odchýlka kruhovitosti, podľa výkresu ,
 w hodnota harmonickej vlny (2-500),
 n_0 konštanta, stanovená výkresom,
 k konštanta, stanovená výkresom [24].

Koeficienty k a n_0 slúžia ako korektúry v pásme malého počtu vln a sú stanovené výkresom. Príklad zobrazenia analýzy RTA je na obrázku č. 25. V prípade prekročenia hraničnej krivky software upozorní na prekročenie tolerance [24].



Obr. 25) Rozloženie signálu do spektra RTA [24]

7.2.3 Protokoly z podniku

Všetky protokoly meraní sú uvedené v prílohe č.2. Merania nepreukázali žiadnu konkrétnu veličinu, ktorá by mohla slúžiť ako triediaci parameter ložísk s danou chybou.

7.3 Meranie v ČMI

Český metrologický institut - ČMI, je štátna inštitúcia, ktorá zabezpečuje jednotnosť a presnosť všetkých meradiel alebo meraní vo vedeckej, technickej a hospodárskej sfére. Metrologický inštitút zaisťuje služby v oblastiach fundamentálnej metrologie, legálnej metrologie, prenosu jednotiek a certifikáciu referenčných materiálov [25].

Cieľom merania v ČMI bolo skontrolovať presnosť merania v podniku a znova premerať hodnoty kruhovitosti krúžkov.

7.3.1 Kruhomer

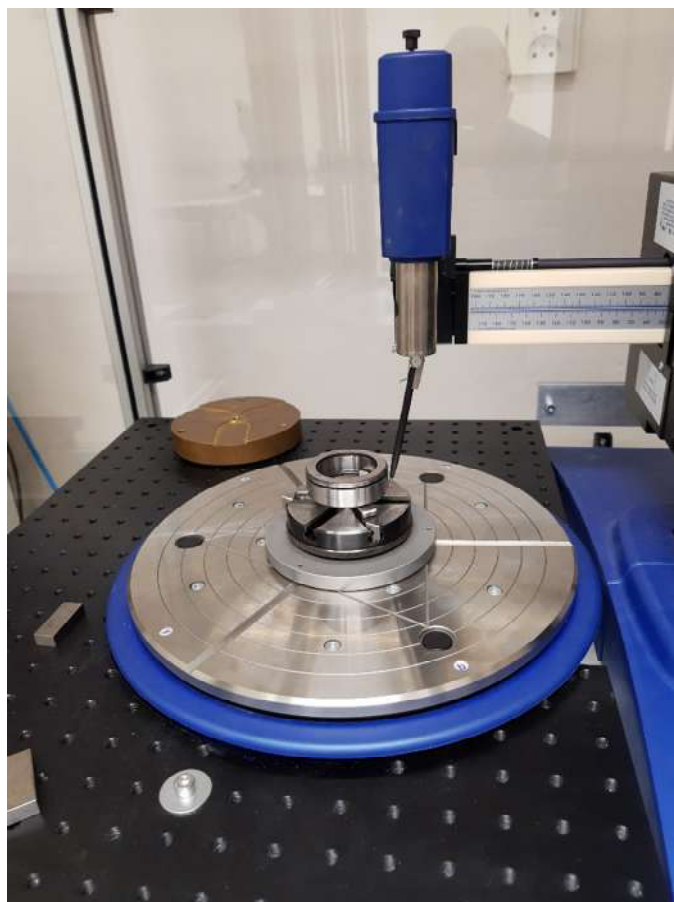
Metrologický inštitút disponuje novším druhom kruhomeru Talyrond 595 do firmy Taylor Hobson. Tento kruhomer je vybavený automatickým centrovaním, takže odpadá vplyv ľudského elementu na meranie. Metroológ umiestni do špeciálneho 6-bodového skľučovadla objekt, vloží ho do presnej pozície a o ostatné sa už stará merací program podľa nastavených podmienok a filtrov. Výsledkom je merací protokol. Na obrázku č. 26 je zobrazený merací prístroj z ČMI.



Obr. 26) Kruhomer Talyrond 595 [26]

7.3.2 Postup merania

Kružky boli najprv očistené papierovou vreckovkou od hrubých nečistôt. Ďalej bolo dôležité skontrolovať skľučovadlo, či je na správnom mieste a či je správne zostavené. Potom bol krúžok vložený do skľučovadla, pričom sa dbalo na jeho orientáciu. Nasledovalo dôkladnejšie čistenie vatovou tyčinkou namočenou v alkohole, čím boli z meranej plochy odstránené všetky nečistoty. Po vykonaní čistiacej procedúry bolo treba krúžok vycentrovať, o čo sa postaral program sám. Vycentrovaní prebehlo vždy niekoľko, až pokým sme neboli spokojní s rozlíšením. Po vycentrovaní bol krúžok pripravený na zmeranie. Na obrázku č. 27 je fotografia krúžka pripraveného na premeranie.



Obr. 27) Fotografia merania kruhovitosti krúžku v ČMI

Meranie krúžkov prebiehalo v troch rovinách. Merala sa vrchná časť a spodná časť obežnej dráhy čo najbližšie k zápichu a stredná časť obežnej dráhy. Pri meraní vonkajšieho povrchu bolo meranie vykonávané v štyroch rovinách a to v spodnej časti, v strede, hore nad zápichom a v časti medzi čelom krúžka a zápichom.

Zo všetkých meraní bol vypracovaný protokol s nameranými údajmi, ktoré boli neskôr vyhodnotené.

7.3.3 Protokoly z ČMI

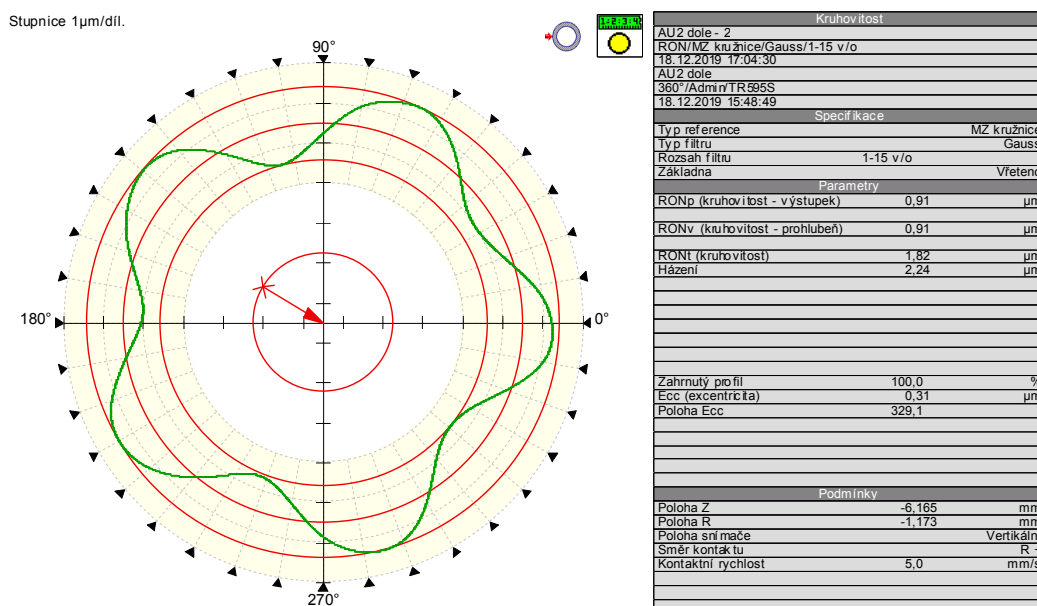
Protokoly z ČMI sú uvedené v prílohe č.3. Meranie krúžkov bolo vykonané tak, aby sa čo najviac podobalo meraniu v podniku. Meraním bolo dokázané, že meranie v podniku je správne a namerané hodnoty sú rádovo rovnaké.

Meraním nebol zistený žiadny parameter, ktorým by sa dali triediť vyrobené krúžky.

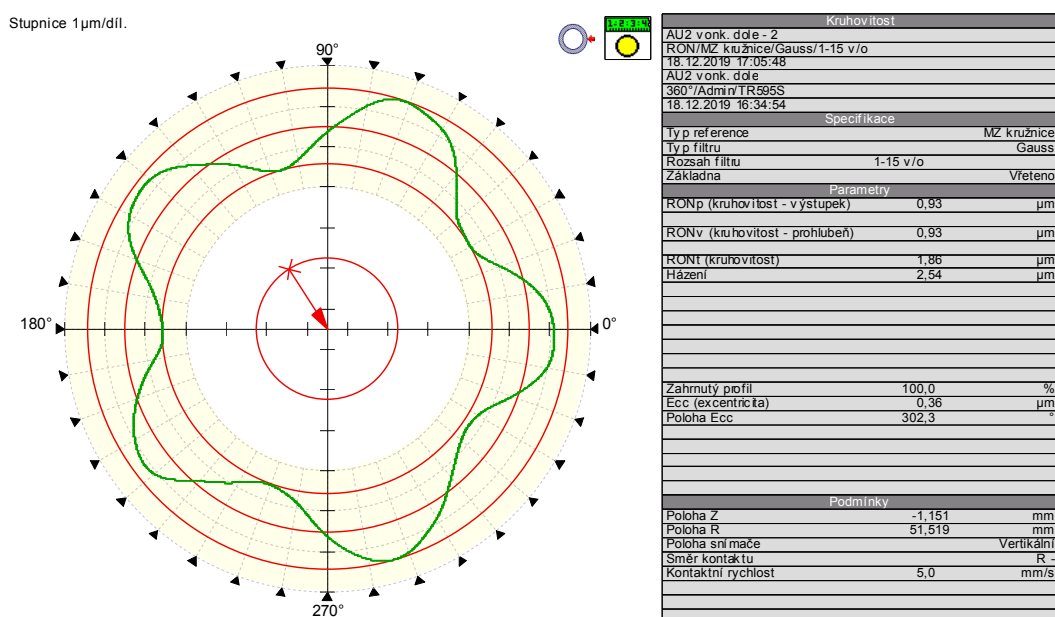
7.4 Výsledky meraní

Naším cieľom bolo zistiť parameter, ktorý by triedil nehluchné a hlučné ložiská. Bohužiaľ sa nepodarilo nájsť žiaden parameter, ktorým by sa dala sledovať možná hlučnosť ložísk už pri ich výrobe. Skúmali sme rôzne výstupné parametre, no pri ich širokej variabilite sme neboli schopní určiť ani jeden.

No pri meraní padla hypotéza, že zvýšenú hlučnosť môže spôsobovať aj nepresnosť obrobenia povrchu krúžku. Preto bola na krúžkoch premeraná kruhovitosť nefunkčných plôch. Pri meraní bolo zistené, že tvar profilu vonkajšieho povrchu je zhodný s tvarom profilu obežnej dráhy. Meraní bolo vykonaných niekoľko v niekoľkých rezoch, pri čom sa dbalo na to, aby sa snímala vždy rovnaká výška krúžku. Týmto bolo dokázané, že dôležitá nie je len presnosť výroby obežnej dráhy, no najmä presnosť výroby vonkajšieho povrchu. Na obrázkoch č. 28 a 29 sú grafy kruhovitosti vnútornej a vonkajšej plochy meraného krúžku.



Obr. 28) Kruhovitosť krúžku meraná na vnútornej ploche



Obr. 29) Kruhovitosť krúžku meraná na vonkajšej ploche

8 RIEŠENIE ZVÝŠENÝCH VIBRÁCIÍ

Pri riešení zvýšených vibrácií sme vychádzali z nameraných údajov najmä zo zistenia, že pri výrobe nie je dôležitá len funkčná plocha ale aj vonkajšia plocha, ktorá nie je funkčnou plochou. Preto bolo treba identifikovať možný zdroj zvýšenej hlučnosti vo výrobnom procese.

8.1 Analýza procesu výroby

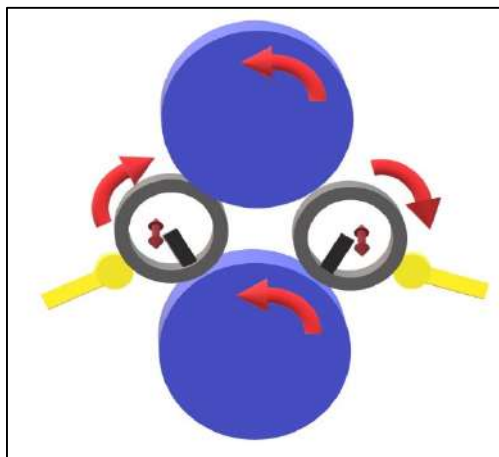
Výroba ložiska má niekoľko krokov. Všetky sú opísané v kapitole 3.5 -Výroba valivých ložísk. Z uvedeného vyplýva, že najväčším vplyvom na kruhovitosť má operácia brúsenia vonkajšieho povrchu na bezhrotovom brúsení, pretože v prípade výroby ložiska s väčšou kruhovitosťou sa táto môže preniesť na obežnú dráhu. Vyrobené krúžky sa v časovom intervale kontrolujú na rozmer a kruhovitosť, no pri výskyte nepriameho čela, zvýšeného alebo zmenšeného úberu alebo medzierke môže prísť k zvýšeným vibráciám krúžku a tým aj k jeho nesprávnemu obrobeniu. Bezhrotová brúska má veľmi vysokú spôsobilosť a vadné diely sa vyrábajú vo veľmi malom počte, úplne nezávisle s takmer nemožnou predikciou ich vzniku. Prakticky je nemožné takýto diel zachytiť bez 100% kontroly vyrobených krúžkov, ktorá je veľmi nákladná.

Krúžok ide ďalej do brúsky obežnej dráhy, vybavenej meracím zariadením, ktoré meria všetky vyrobené krúžky. Meranými parametrami sú odchýlka kruhovitosti a rozmer. Prístroj ale nevyhodnocuje tvar profilu ani iné hodnoty kruhovitosti. Poslednou operáciou je honovanie obežnej dráhy krúžku. Táto operácia nemá žiadne kontrolné parametre.

Pri analýze bola zistená možnosť použitia novej technológie honovania. Táto technológia sa nepoužíva pri výrobe tohto druhu krúžkov. Preto bola experimentom zisťovaná presnosť výroby na novom type honovacieho stroja.

8.1.1 Pôvodná technológia honovania

Princíp pôvodnej technológie sa vo firme používa už vyše 30 rokov. Krúžok sa dostane žľabom na presné miesto obrábania. Ďalej je ustavený v roľniach, ktoré vytvárajú otáčavý pohyb krúžku a v klzných opierkach, ktoré zaručujú stálu polohu krúžkov, viď. Obrázok č. 30. Pri otáčaní krúžkov sa do otvoru vsunie honovacia hlava s honovacím kameňom, ktorý s malým prítlakom a kontinuálnym periodickým posuvom dokončuje obežnú dráhu krúžku, čo zabezpečuje otáčajúca sa vačka. Honovací stroj disponuje dvoma stanicami honovania, môžu sa použiť obe alebo len jedna.



Obr. 30) Schéma honovania - Stará technológia (modrá - roľne, žltá - klzné opierky, sivá - krúžky, čierna - hon. kamene, červená - rotačný alebo posuvný pohyb)

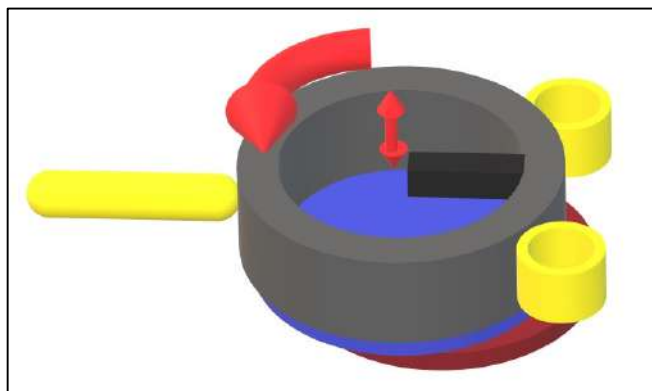
Referenčnou plochou tejto operácie je vonkajší povrch krúžku.

Nevýhodou tohto stroja je malá škála nastaviteľnosti vstupných parametrov. Pri honovaní v dvoch staniách sa totiž oba krúžky musia otáčať rovnakou rýchlosťou a taktiež posuv honovacieho kameňa musí byť zhodný.

8.1.2 Nová technológia honovania

Nová technológia honovania sa líši od starej vo všetkých smeroch. Krúžok sa do stroja dostane posuvným dopravníkom. Vo vnútri stroja sa nachádza nabíjač a časovací kotúč, ktorý posúva krúžky v presne stanovených intervaloch po jednotlivých stanovištiach. Krúžok leží na otáčajúcej sa rolni, ku ktorej je pritláčaný mierne vyoseným magnetom. Ustavený je v dvoch ložiskách a jednej klznej opierke. Tieto prípravky zaručujú presné centrovanie obrábaného krúžku, viď obrázok č. 31. Do otáčajúceho sa krúžku sa vsunie honovacia hlava, ktorá vytvára periodický pohyb brúsneho kameňa po celej šírke obežnej dráhy. Táto technológia disponuje navyše malou osciláciou honovacieho kameňa - krátky zdvih, ktorý zaručuje dokonalé obrobenie okrajových častí obežnej dráhy krúžku. Po obrobení je krúžok odmagnetizovaný.

Honovací stroj disponuje dvomi stanicami honovania. Obe sú od seba nezávislé, existuje možnosť širšieho spektra nastavenia vstupných parametrov (otáčky obrobku, rýchlosť posuvu honovacieho kameňa, oscilácia honovacieho kameňa, obrábací čas, prítlak).



Obr. 31) Schéma honovania - Nová technológia (modrá - roľňa, žltá - klzná opierka, ložiská, sivá - krúžok, čierna - hon. kameň, bordová - magnet, červená - rotačný a posuvný pohyb)

Druhou výhodou je geometria stroja. Pri tomto type brúsenia honovací kameň netlačí priamo na protikus ako v staršej technológii, ale presne v strede medzi dvoma ložiskami. Toto nastavenie zaručuje menší prenos kruhovitosti z vonkajšieho povrchu krúžku, no je náchyľnejšie na radiálne hádzanie [5].

Nevýhodou tejto technológie je referenčná plocha. Pri staršej technológii bola referenčná plocha tvorená iba vonkajším povrchom krúžku, pri použití novšej technológie referenčnú plochu tvorí vonkajšia plocha krúžku a čelo krúžku.

Obrázky č.30 a 31 (schémy honovania) boli vytvorené samostatne v programe 3D Skicár na základe schémy honovacieho procesu, nadobudnutých znalostí a skúseností pri spracovaní tejto diplomovej práce.

8.2 Simulácia procesu

Cieľom simulácie bolo porovnať dve technológie honovacieho procesu. Simulácia spočívala v nastavení vstupných parametrov honovacieho stroja. Na pôvodnom, staršom type je možné nastaviť nasledovné parametre:

- rýchlosť vretena, ktoré roztáča obrobok,
- rýchlosť vačky, ktorá otáčaním posúva honovací kameň a
- čas obrábania.

Pri simulácií sa menil vždy jeden parameter, ostatné parametre zostali rovnaké. Pre kontrolu pôvodného procesu bolo vykonaných 6 simulácií. Prvým typom bol proces s bežnými vstupnými hodnotami. Druhým typom bola simulácia len s jednou zastávkou honovania. Posledným typom bola simulácia zmeny jedného z troch parametrov. Celkovo bolo vykonaných šesť skúšok so vstupnými parametrami podľa tabuľky č. 4.

Tab 4) Tabuľka nastavenia vstupných parametrov pôvodného honovacieho stroja

Identifikačné číslo	Počet zastávok honovania	Otáčky vretena	Otáčky vačky	Čas obrábania
AU 1 -štandard	2	1500	160	3 s
AU 2	1	1500	80	6 s
AU 3	2	2000	80	6 s
AU 4	2	1000	80	6 s
AU 5	2	1500	80	9 s
AU 6	2	1500	160	6 s

Druhou etapou simulácie boli skúšky na novšom type honovacieho stroja. Tento disponuje okrem zmeny rýchlosti otáčania, posuvu a času obrábania aj nastavením malej oscilácie honovacieho kameňa, tzv. krátkym zdvihom. Pri simulácií bolo v tomto prípade menené len nastavenie malej oscilácie, ostatné parametre sa nastavujú automaticky. Nastavenia sú uvedené v tabuľke č. 5.

Tab 5) Tabuľka nastavenia vstupných parametrov nového honovacieho stroja

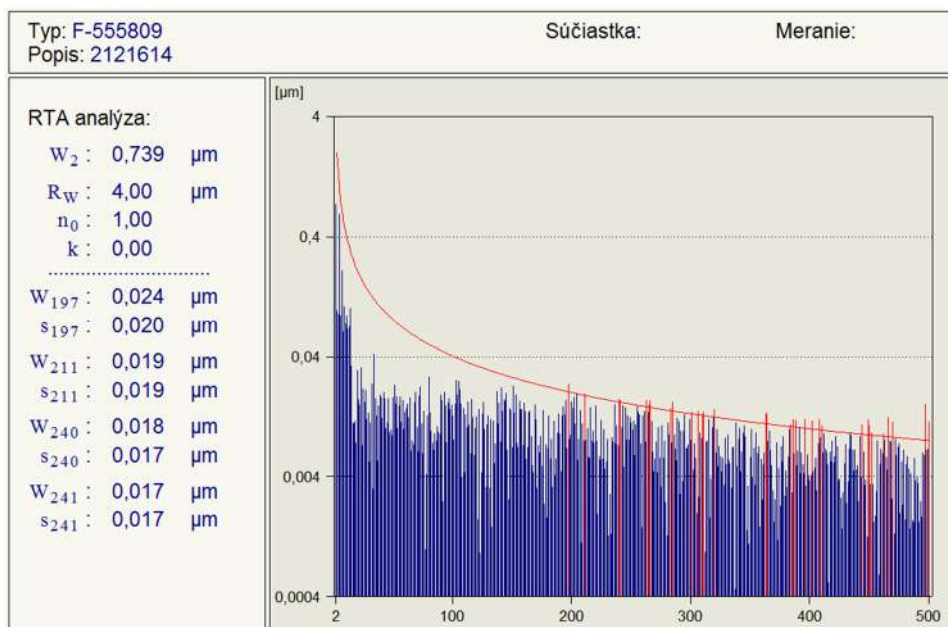
Identifikačné číslo	Malá oscilácia
AU 7	0,2 mm
AU 8	0,5 mm
AU 9	0,8 mm
AU 10	1,0 mm

Po jednotlivých meraniach sme mali dokopy 20 krúžkov, každým nastavením boli obrobené 2 krúžky. Krúžky boli následne očistené handričkou a premerané na meracom pracovisku. Každý krúžok bol premeraný v dvoch rezoch. V ďalšej kapitole sú uvedené výsledky analýz krúžkov s vyššími amplitúdami.

8.2.1 Výsledky simulácie

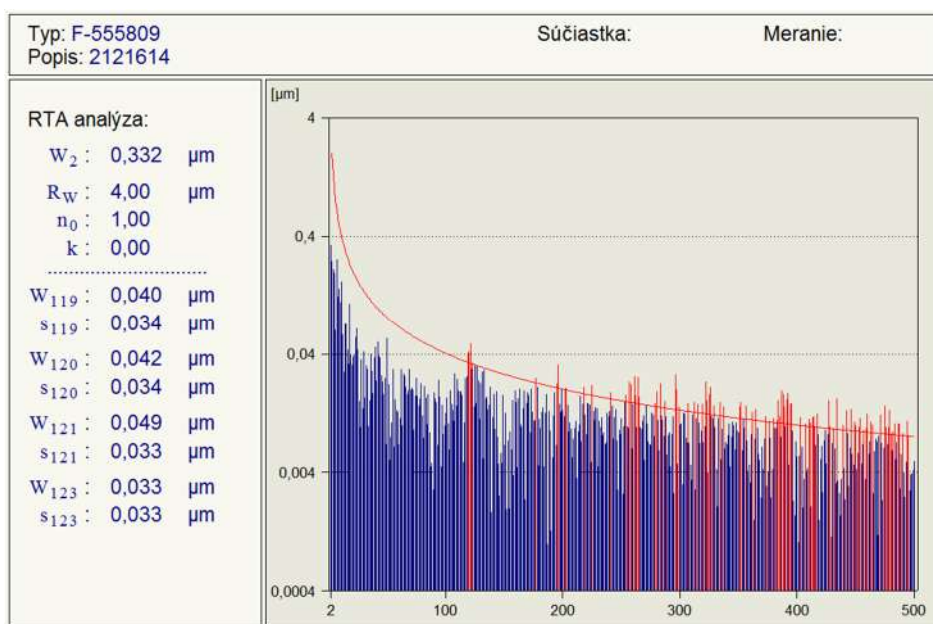
Po premeraní všetkých krúžkov bolo zistené, že jednotlivé parametre kruhovitosti, vlnitosti nepreukázali výraznú zmenu pri rozličných simuláciách honovacieho procesu. Východiskovou sa tak stala analýza RTA, ktorá vykazovala dostatočne viditeľný rozdiel v jednotlivých simuláciách. Na nasledujúcich obrázkoch č. 32 až 41 sú zobrazené jednotlivé grafy analýzy RTA vonkajších krúžkov rôznych nastavení, pričom sú uvedené analýzy krúžkov s vyššími amplitúdami. V prílohe č. 4 sú celé laboratórne protokoly.

Na obrázku č. 32 je zobrazená RTA analýza krúžku AU 1 s vyššími amplitúdami štandardného nastavenia honovacieho stroja.



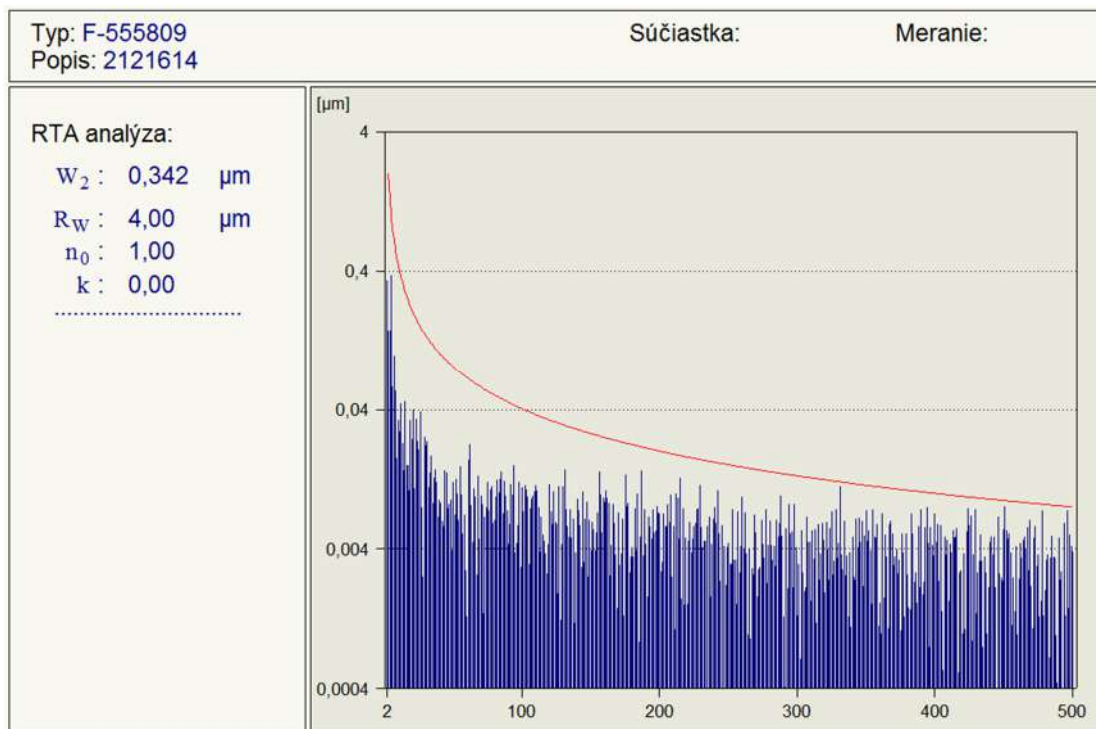
Obr. 32) RTA krúžku AU 1 – štandardné nastavenia stroja

Na obrázku č. 33 je zobrazená RTA analýza krúžku AU 2 s vyššími amplitúdami nastavenia stroja s jedným zastavením honovania.



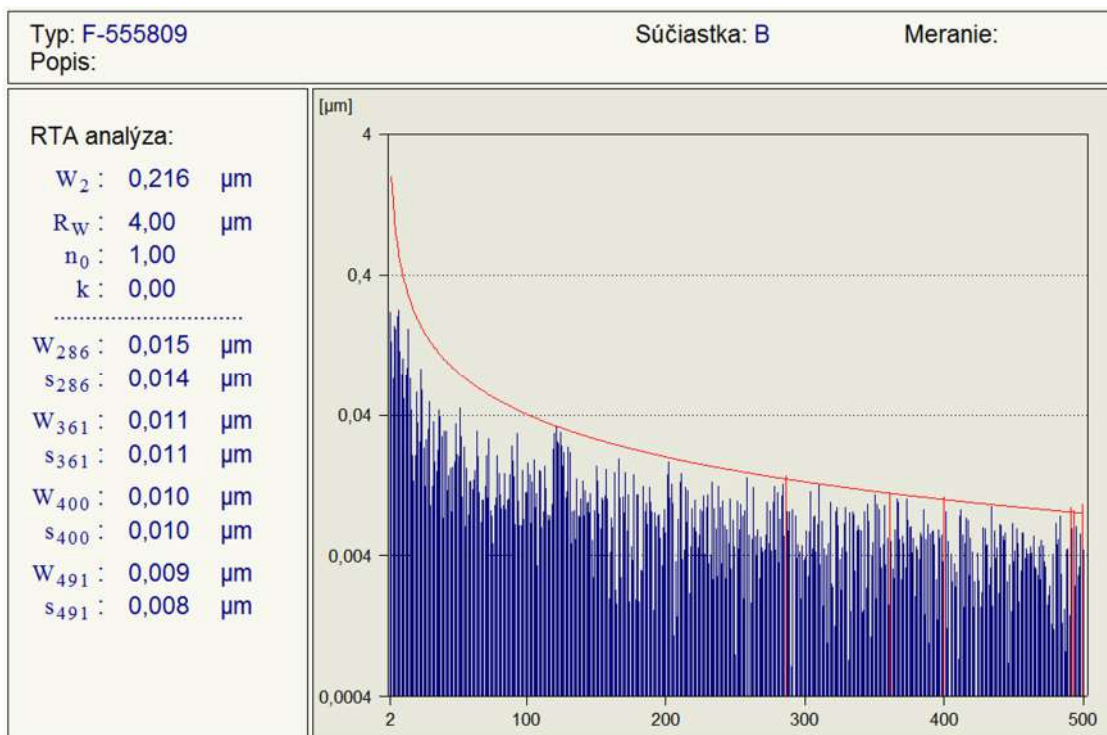
Obr. 33) RTA krúžku AU 2 - jedna zastávka honovania

Na obrázku č. 34 je zobrazená RTA analýza krúžku AU 3 s vyššími amplitúdami nastavenia stroja s otáčkami krúžku 2000.



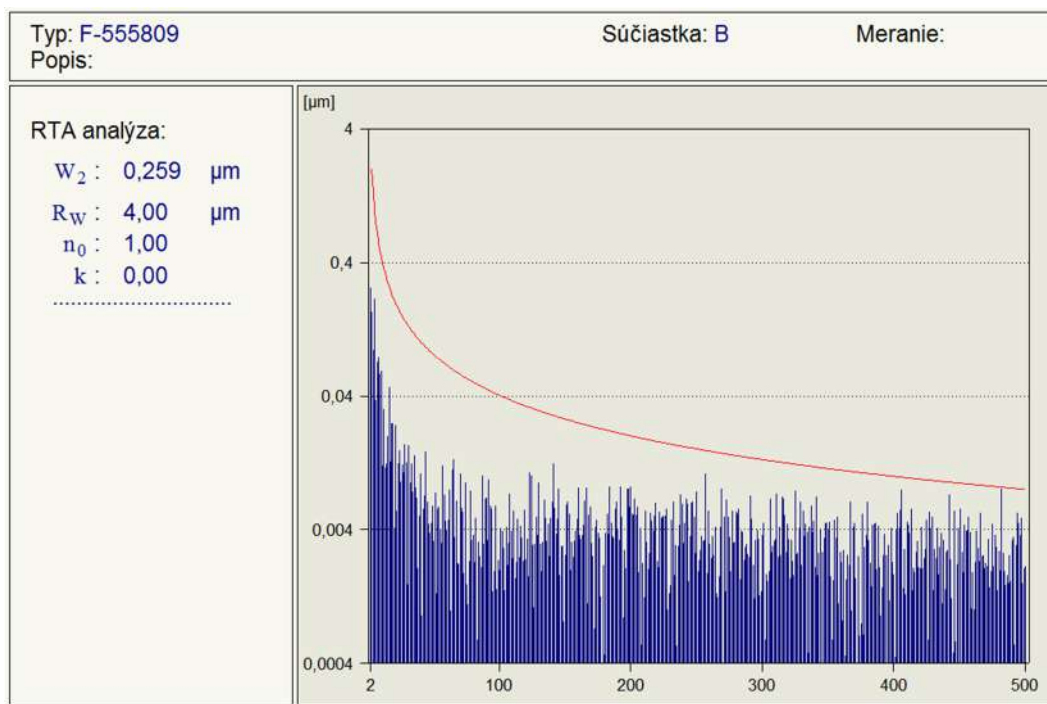
Obr. 34) RTA krúžku AU 3 - nastavenie otáčok krúžku 2000

Na obrázku č. 35 je zobrazená RTA analýza krúžku AU 4 s vyššími amplitúdami nastavenia stroja s otáčkami krúžku 1000.



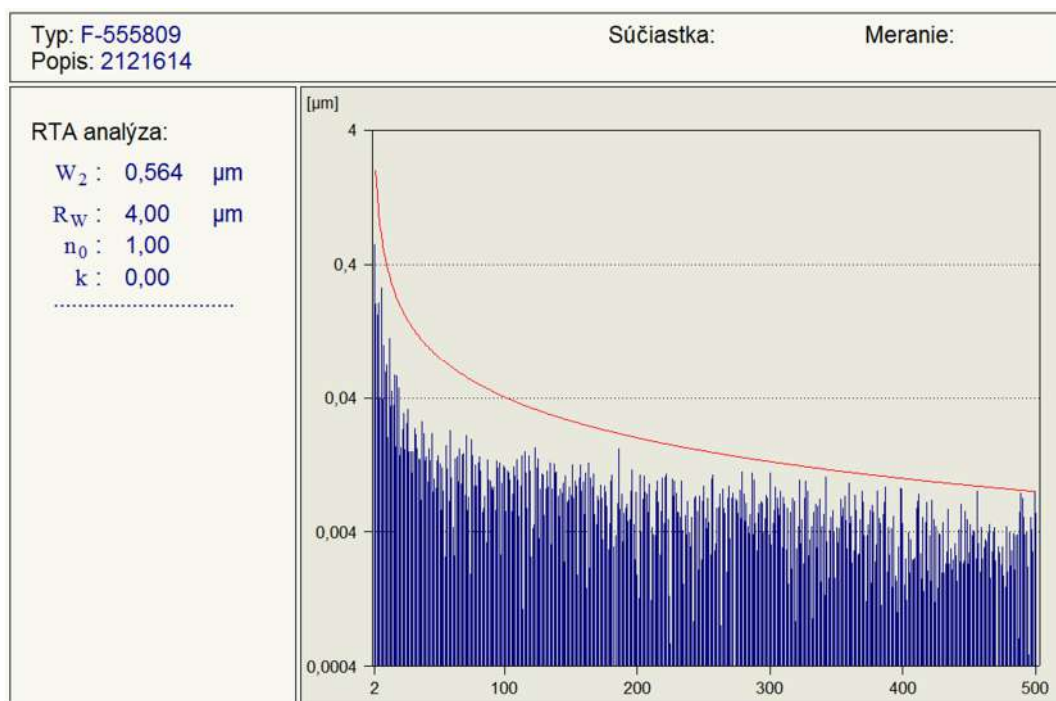
Obr. 35) RTA krúžku AU 4 - nastavenie otáčok krúžku 1000

Na obrázku č. 36 je zobrazená RTA analýza krúžku AU 5 s vyššími amplitúdami nastavenia stroja s časom obrábania 9 sekúnd.



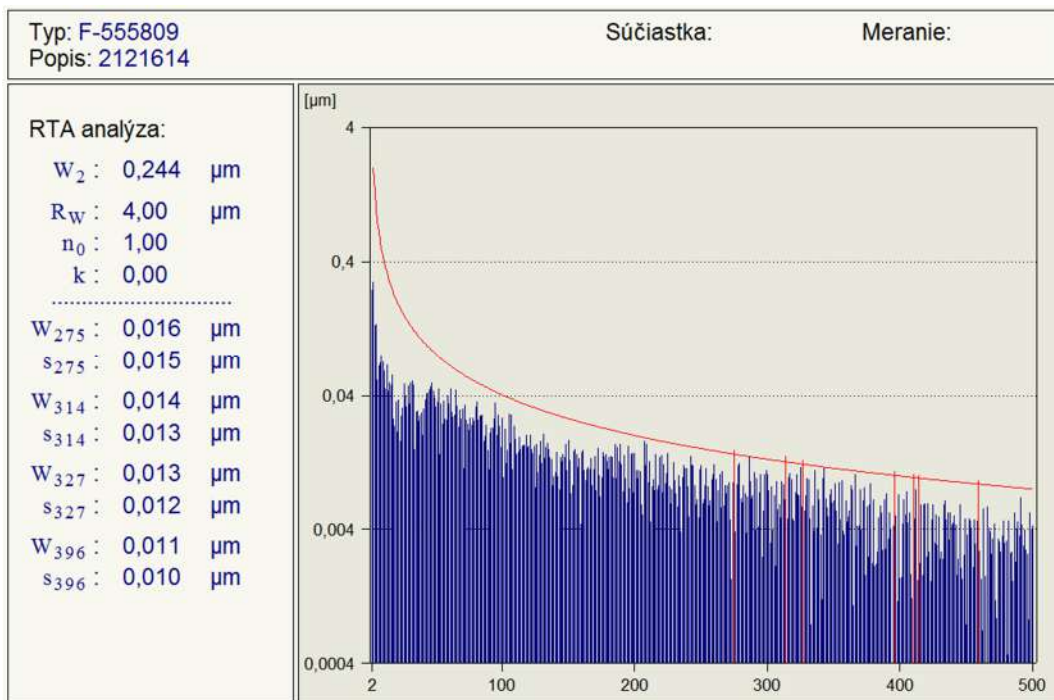
Obr. 36) RTA krúžku AU 5 - nastavenie času obrábania 9 s

Na obrázku č. 37 je zobrazená RTA analýza krúžku AU 6 s vyššími amplitúdami nastavenia stroja s otáčkami vachky, a teda rozdielnou rýchlosťou honovacieho kameňa 160.



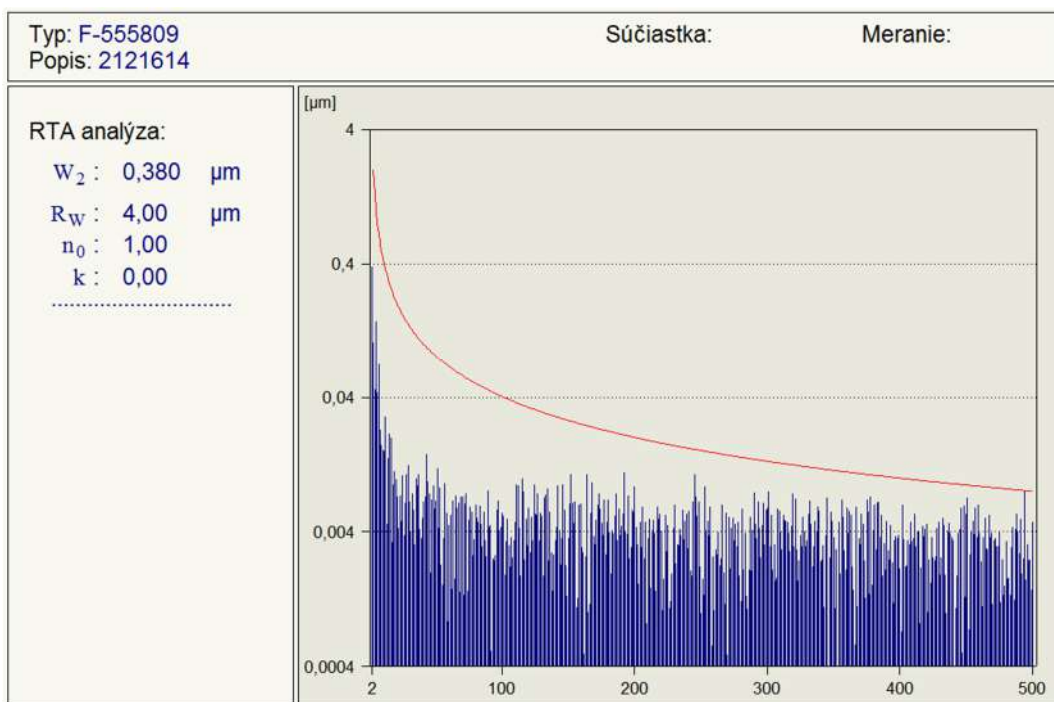
Obr. 37) RTA krúžku AU 6 - otáčky vachky 160

Nasledujú grafy RTA analýzy krúžkov pri simulácii procesu na novšom type honovacieho stroja. Na obrázku č. 38 je zobrazená RTA analýza krúžku AU 7 s vyššími amplitúdami nastavenia stroja s malou osciláciou 0,2 mm.



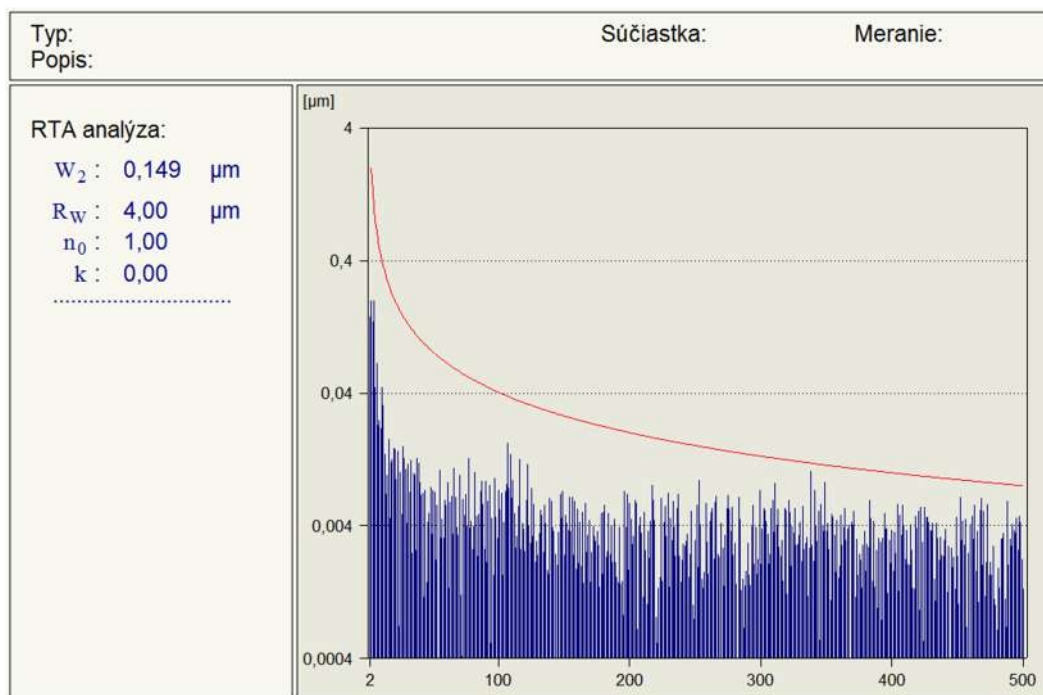
Obr. 38) RTA krúžku AU 7 - nastavenie malej oscilácie 0,2 mm

Na obrázku č. 39 je zobrazená RTA analýza krúžku AU 8 s vyššími amplitúdami nastavenia stroja s malou osciláciou 0,5 mm.



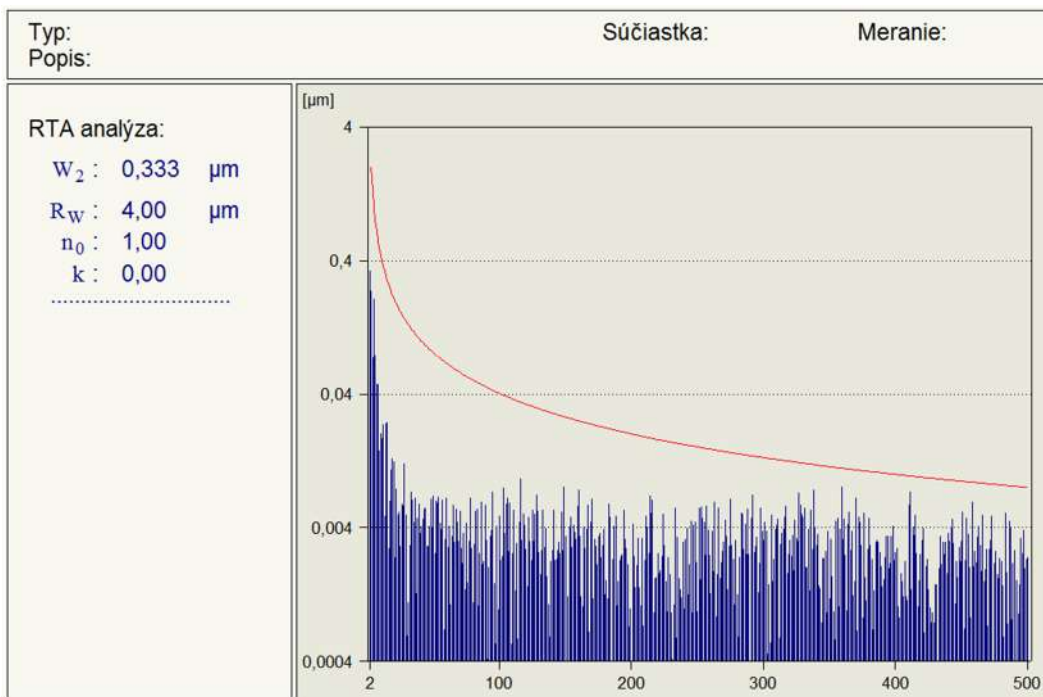
Obr. 39) RTA krúžku AU 8 - nastavenie malej oscilácie 0,5 mm

Na obrázku č. 40 je zobrazená RTA analýza krúžku AU 9 s vyššími amplitúdami nastavenia stroja s malou osciláciou 0,8 mm.



Obr. 40) RTA krúžku AU 9 - nastavenie malej oscilácie 0,8 mm

Na obrázku č. 41 je zobrazená RTA analýza krúžku AU 10 s vyššími amplitúdami nastavenia stroja s malou osciláciou 1,0 mm.



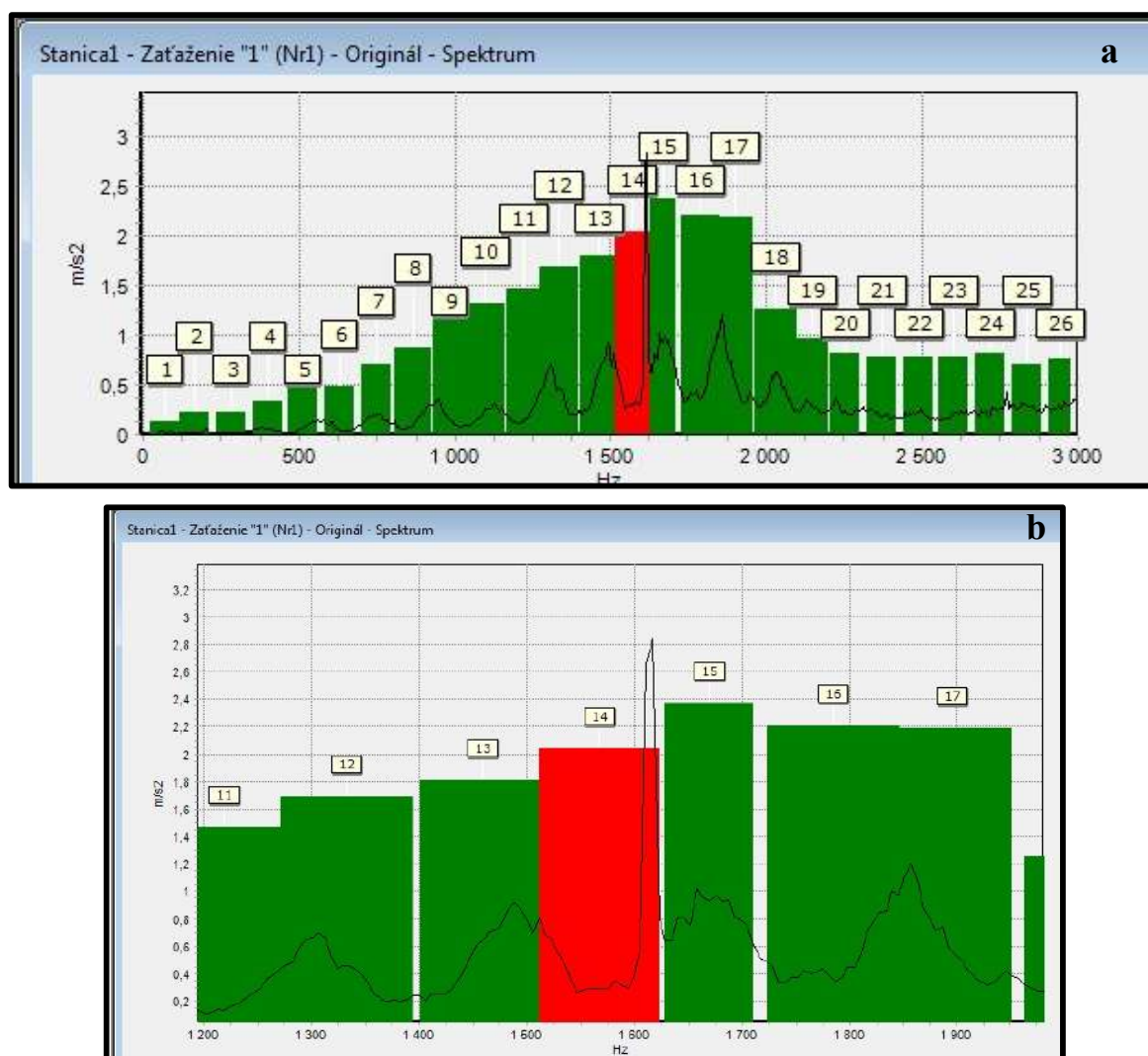
Obr. 41) RTA krúžku AU 10 - nastavenie malej oscilácie 1,0 mm

8.2.2 Vyhodnotenie simulácie

Z nameraných údajov plynie nasledovné. Pri porovnaní parametrov otáčok na staršom type honovacieho stroja môžeme sledovať zlepšenie pri vyšších otáčkach obrobku. Čo sa týka zmeny času obrábania, tá značne zlepšila celé spektrum RTA analýzy. Zmena rýchlosti otáčania vachky, teda rýchlosti posuvu honovacieho kameňa, nepreukázala výrazné zlepšenie povrchu obrábanej plochy.

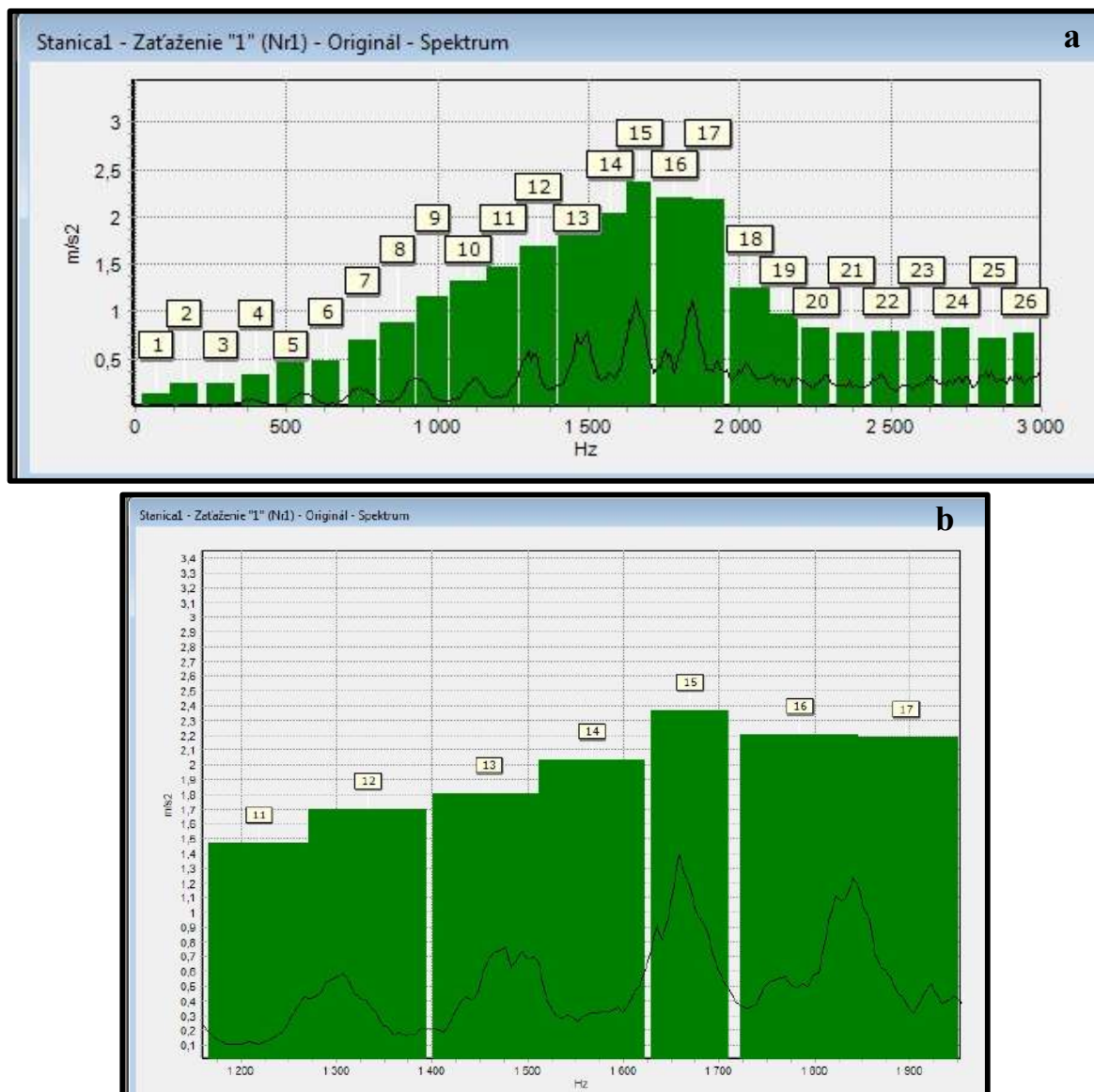
Novšia technológia honovacieho stroja obrobila povrch krúžku oveľa lepšie a odstránila možné defekty. Pri porovnaní jednotlivých simulácií sa javí najlepšie nastavenie malej oscilácie na hodnoty 0,5 mm až 0,8 mm. Pri vyšších hodnotách stúpajú niektoré vrcholy RTA analýzy.

Posledným krokom experimentu bolo porovnať „hlučnosť“ týchto dvoch metód obrábania. Na obrázku č. 42, je zobrazená „hlučnosť“ ložiska, ktoré bolo najprv obrobené na staršom type honovacieho stroja.



Obr. 42) „Hlučnosť“ ložiska obrobeného staršou technológiou
(obr. a - celé spektrum, obr. b - detail spektra)

Z ložiska sme následne vybrali valčeky a klietku a krúžok dali obrobit' novším typom honovacieho stroja. Po obrobení bol krúžok opäť umiestnený na montážnu líniu, zmontovaný a ložisku bola premeraná jeho „hlučnosť“. Graf „hlučnosti“ je na obrázku č. 43.



Obr. 43) „Hlučnosť“ ložiska obrobeneho novšou technológiou
(obr. a - celé spektrum, obr. b - detail spektra)

Týmto bolo dokázané, že nová technológia honovacieho procesu je schopná krúžok obrobit' s takou presnosťou, aby sa chyba na 14. tolerančnom poli frekvenčného spektra už nevyskytovala. Celá tabuľka je v prílohe č. 5.

8.3 Štatistické vyhodnotenie

Po simulácii procesu a testovaní nového honovacieho stroja bol vykonaný experiment výroby celej zákazky na novom honovacom stroji. Pre štatistické vyhodnotenie bol použitý spôsob vyhodnotenia nepodarkovosti vyjadrený v % z celého počtu vyrobených krúžkov.

Pre analýzu bola sledovaná „hlučnosť“ ložísk obrobených pôvodnou aj novou technológiou. Analyzované boli dve zákazky. Prvá zákazka bola obrobená pôvodnou, staršou technológiou, pričom bol obrobený bežný počet krúžkov rozdelený na 8 zmien. Druhá, skúšobná zákazka bola obrobená novšou technológiou, pričom bol použitý len určitý počet krúžkov rozdelený na 2 zmeny. V tabuľke č. 6 sú znázornené počty vyrobených krúžkov a ich nepodarkovosť. Sledovaným parametrom nebola len zvýšená „hlučnosť“ na 14. tolerančnom poli frekvenčného spektra ale aj iné hodnoty „hlučnosti“.

Tab 6) Tabuľka porovnania nepodarkovosti technológií honovania

Technológia	Počet vyrobených dielov	Počet hlučných dielov	Počet výrobných zmien	Počet vyrobených dielov/ zmena	Počet hlučných dielov/ zmena	Nepodarkovosť
Stará	28160	802	8	3520	100,25	2,85%
Nová	5120	47	2	2560	23,5	0,92%

Porovnaním hodnoty nepodarkovosti oboch technológií je dokázané zlepšenie celého procesu. Pri analyzovaní hlučnosti ložísk, ktorých krúžky boli obrobené novou technológiou honovania sa viac neukázala zvýšená hodnota „hlučnosti“ na 14. tolerančnom poli frekvenčného spektra.

8.4 Návrh opatrenia

Výrobný proces vonkajšieho krúžku ložiska pozostáva z niekoľkých operácií, z ktorých má každá vplyv na výslednú kvalitu ložiska. Tento proces ale nie je bezchybný a výsledkom nemusí byť vždy kvalitný výrobok. Preto bolo navrhnuté používať namiesto pôvodnej technológie novší typ stroja s novou technológiou.

Jedným z prínosov je servis. Starší prístroj sa často kazí, vyskytujú sa u neho zvýšené vibrácie a generálny servis sa stáva rok od roku drahší. Naopak, nový honovací stroj sa vykazuje vyššou mierou spôsobilosti a oveľa menšou mierou poruchovosti.

Ďalším z prínosov je lepšie obrobenie dielu. Pri výskyte dielu s vyššími hodnotami kruhovitosti alebo priamo s jedným s profilov sa použitím staršej technológie tieto hodnoty skoro nezmenia. Naopak, pri použití novšej technológie sa lepším uchytením prenášajú nedokonalosti z vonkajšieho povrchu dielu v oveľa menšej miere. Pri meraní „hlučnosti“ bolo dokázané, že nová technológia obrobí diel v takej kvalite, že sa viac nevyskytuje chyba 14. tolerančného poľa na „hlukomere“.

Posledným z prínosov je menšia nepodarkovosť stroja. Pri meraní „hlukomerom“ staršou metódou je pravdepodobnosť vzniku dielu s vyššou „hlučnosťou“ oveľa menšia.

9 ZHODNOTENIE

Cieľom tejto diplomovej práce bolo analyzovať konkrétny typ valčekového ložiska vzhľadom na jeho hlučnosť. Toto analyzovanie prebehlo v dvoch rovinách tak, aby boli splnené ciele práce.

Prvou úlohou bolo nájsť parameter, ktorým by bol podnik schopný triediť závadné ložiská, vykazujúce sa zvýšenými hodnotami hlučnosti v 14. tolerančnom poli frekvenčného spektra „hlukomeru“. Pre splnenie tohto cieľa bolo potrebné oboznámiť sa s javmi ako vibrácie a hlučnosť a meraním, ktorými sa dajú tieto hodnoty sledovať.

V prvom kroku boli ložiská analyzované na meracom ostrovčeku v podniku. V druhom kroku boli ložiská analyzované kruhomerom v Českom metrologickom inštitúte v Brne. Po analýze všetkých nameraných údajov sme bohužiaľ neboli schopní určiť jeden konkrétny parameter, ktorým by sa vykazovala skupina ložísk so zvýšenou hlučnosťou. Analýza tejto chyby by si vyžadovala oveľa dlhšie analyzovanie, nakoľko na celkovú hlučnosť ložísk vplýva obrovské množstvo parametrov. Najlepšou možnosťou by bolo analyzovanie povrchu celej obežnej dráhy. Táto technológia však nie je v súčasnosti v podniku ani na ČMI dostupná.

Prínosom merania bolo zistenie, že profil vonkajšieho povrchu ložiska bol vo všetkých prípadoch zhodný s vnútorným profilom krúžku – obežnou dráhou, po ktorej sa odvaľujú valivé telieska. Týmto bol určený postup druhého cieľa diplomovej práce, a to návrh na zlepšenie procesu výroby ložiska.

Pre splnenie druhej úlohy bolo najprv potrebné oboznámiť sa s celou výrobou ložiska. Výrobný proces ložiska sa skladá z niekoľkých operácií a pri každej sa vyskytuje obrovské množstvo elementov, ktoré ovplyvňujú kvalitu procesu výroby od kvality vstupného materiálu, cez čistotu mazacieho média, po presnosť náradia. Pre spracovanie práce bola venovaná pozornosť len posledným brúsnym operáciám vonkajšieho povrchu, vnútorného povrchu a dokončovaniu obežnej dráhy.

Prvými dvoma operáciami je brúsenie vonkajšieho a vnútorného povrchu krúžku. Pri týchto operáciách sa môže vyskytnúť celé spektrum problémov, ktoré majú vplyv na výslednú kvalitu obrobeneho krúžku. Proces disponuje aj 100% kontrolnou stanicou, ktorá, ale nie je schopná vytriediť všetky chybné krúžky. Presnejšie kontrolné stanice sa nachádzajú v ďalšom procese a preto podnik nemá snahu túto stanicu zlepšiť.

Poslednou operáciou je dokončovanie obežnej dráhy. Pri analýze bola zistená možnosť použitia novšieho typu honovacieho stroja. Novší typ disponuje rozdielnym spôsobom ustavenia obrobku, pričom geometria nie je tak náchylná na prenos profilu vlnitosti a kruhovitosti z vonkajšieho povrchu na obežnú dráhu. Po experimente bolo zistené lepšie obrobenie obežnej dráhy a zlepšenie celkového parametra hlučnosti ložiska.

Preto bolo určené testovanie výroby celej zákazky na novom type honovacieho stroja. Po analyzovaní hlučnosti celej zákazky bola vypočítaná nepodarkovosť 0,92%, pričom použitím staršej technológie mala nepodarkovosť hodnotu 2,85% s tým, že sa zvýšená hodnota hlučnosti na 14. tolerančnom poli viac nevyskytovala. Týmto bolo dokázané zlepšenie obrobeneho povrchu a tým aj celého procesu výroby vonkajšieho krúžku.

Ďalším z prínosov je vyššia spôsobilosť stroja. Pri používaní staršej technológie sa často vyskytujú problémy a generálne opravy sú rok od roku drahšie. Servis nového stroja nie je taký častý a interval, v ktorom plní požadované vlastnosti výrobku, je oveľa dlhší.

10 ZÁVER

Spolupracujúci strojársky podnik dostal od zákazníka reklamáciu na hlučnosť ložísk. Zákazník poslal podniku tri skupiny ložísk, z ktorých jedna bola bezchybná a ďalšie dve sa vykazovali zvýšenými hodnotami hlučnosti. Po analýze bola stanovená príčina hlučnosti prvej skupiny, ktorou boli valivé telieska a druhá skupina ložísk sa vykazovala neznámou chybou na vonkajšom krúžku. Hlavnou úlohou tejto práce bolo analyzovať práve poslednú skupinu ložísk s danou chybou na krúžku a navrhnúť také opatrenie, ktoré by eliminovalo jej vznik.

Prvý cieľ diplomovej práce – opis súčasného stavu procesu kontroly kvality valivého ložiska je splnený v kapitole č. 3 a 6. Na kvalitu valivých ložísk vplýva obrovské množstvo rôznych aspektov kvality, vibrácie, respektíve hlučnosť sú len jedným z nich. Výsledkom bolo pochopenie procesu výroby a procesu kontroly, funkcie a významu valivých ložísk, ktoré bolo nevyhnutné pre splnenie ďalších cieľov práce.

Druhý cieľ diplomovej práce – systémový rozbor hodnotenia kvality ložísk pomocou vibračnej diagnostiky a diagnostiky hlučnosti je splnený v teoretických kapitolách práce č.4 a 5. V tejto časti je analyzovaná teória vibrácií a teória hlučnosti, ktoré navzájom veľmi úzko súvisia. Táto kapitola pojednáva o teoretických zákonitostiach, typoch signálov, jednotlivých parametroch a spôsoboch ich merania. V kapitole č. 6 sú rozobrané metódy merania vibrácií a hlučnosti ložísk. Táto kapitola sa venuje spôsobom vzniku zvýšených hodnôt vibrácií, respektíve hlučnosti ložísk a popisu merania vibrácií podľa normy ISO 15242. Posledným krokom je detailne opísané meranie hlučnosti v podniku. Spolupracujúci podnik používa „hlukomer“, ktorý si sám zostavil a v skutočnosti je špeciálnym analyzátorom vibrácií s akustickým výstupom.

Splnenie ďalšieho cieľa diplomovej práce – návrh a zdôvodnenie vybraného postupu riešenia problému zvýšených vibrácií a hlučnosti analyzovaného typu ložiska bolo rozdelené do dvoch krokov, kapitola č.7. Prvým krokom celej analýzy bolo zozbieranie vzoriek ložísk, ktoré sa vykazovali zvýšenou hodnotou hlučnosti na 14. tolerančnom poli frekvenčného spektra „hlukomeru“. Boli vytvorené 2 skupiny po piatich ložiskách, 5 ložísk sa touto chybou vykazovalo a 5 bolo bezchybných. Z ložísk boli najprv opatrne odstránené valčeky a klietka. Vnútorne krúžky boli následne očistené a premerané na meracom ostrovčeku v podniku. Meranými hodnotami boli kruhovitosť, vlnitosť, drsnosť a tvar profilu. Táto analýza však nepriniesla želaný výsledok – triediaci parameter nebol stanovený.

Druhým krokom bolo meranie v Českom metrologickom inštitúte v Brne. Český metrologický inštitút disponuje novším kruhomerom s presnejším meraním kruhovitosti. Krúžky boli očistené alkoholom a jednotlivo premerané na parametre kruhovitosti. Ani týmto meraním však nebol stanovený parameter, ktorým by sme boli schopní rozdeliť ložiská na hlučné a bezchybné. Avšak pri meraní boli zmerané aj vonkajšie povrchy vonkajších krúžkov. Tieto povrchy nemajú priamy vplyv na celkovú funkciu ložiska, no meraním bolo zistené, že profil vonkajšej plochy a vnútornej plochy obežnej dráhy sú rovnaké. Výsledkom bolo stanovenie hypotézy, že spôsob obrobenia vonkajšej plochy krúžku má významný vplyv na parametre obežnej dráhy a teda aj kvalitu celého ložiska.

Pri analyzovaní funkčných plôch ložísk by najlepšou možnosťou bolo analyzovanie celej plochy. Táto technológia však nie je v súčasnosti v podniku ani na ČMI dostupná.

Štvrtému cieľu diplomovej práce – realizácii vybraného postupu sa venuje kapitola č. 8. V tejto kapitole bolo riešené nápravné opatrenie na hlučnosť ložiska. Podľa informácií zistených analyzovaním ložiska bolo potrebné analyzovať celý proces výroby vonkajšieho krúžku. Kľúčovými operáciami boli stanovené operácie brúsenia vonkajších plôch, vnútorných plôch a dokončovacia operácia tzv. honovanie. Vonkajší povrch krúžku sa obrába na brúsných strojoch s bezhrotovou technológiou brúsenia. Pri analýze bolo zistené celé spektrum možných problémov. Stroj však obrába krúžky takou rýchlosťou, že je skoro nemožné zaznamenať chybu na obrobenom krúžku. Stroj by musel disponovať 100% kontrolnou stanicou, ktorá v aktuálnej situácii nie je pre podnik ekonomicky prijateľná.

Ďalšou brúsnou operáciou je brúsenie obežnej dráhy krúžku. Príslušný stroj disponuje 100% kontrolnou stanicou, ktorá v prípade zvýšenej hodnoty kruhovitosti alebo rozmerovej odchýlky vyhodnotí krúžok ako chybný a presunie ho do krabíčky na nepodarky.

Poslednou operáciou je dokončovanie obežnej dráhy – honovanie. Pri analyzovaní bola zistená možnosť použitia novej technológie, ktorá sa na daný typ krúžkov nepoužíva. Preto bol stanovený experiment simulovania výroby tak, aby boli porovnané obe technológie. Pri tejto simulácii boli menené vstupné parametre honovacieho stroja tak, aby sa vždy menil len jeden parameter. Pri simulácii procesu na honovacom stroji novšieho typu bola menená hodnota malej oscilácie honovacieho kameňa, ktorou disponuje len tento typ stroja. Po simulácii boli všetky krúžky analyzované v podniku a následne boli vyhodnotené výsledky.

Použitie staršej technológie, kde prítlačná sila honovacieho kameňa tlačí na roľňu, vyhodnotila analýza ako horší výsledok. Možným zlepšením procesu sa ukázalo zvýšenie otáčok obrobku alebo zvýšenie času obrábania. Tieto zmeny by ale priniesli zvýšenie výrobných nákladov procesu, nakoľko by sa buď predĺžil čas, alebo by sa míňalo väčšie množstvo honovacieho materiálu.

Použitie novej technológie, kde prítlačná sila honovacieho kameňa leží medzi dvoma upínacími ložiskami, však ukázalo významne lepšie výsledky. Obežná dráha bola oveľa lepšie obrobená a hodnoty kruhovitosti a vlnitosti boli významne menšie. Nakoniec boli krúžky vykazujúce zvýšenú hodnotu hlučnosti na 14. tolerančnom poli frekvenčného spektra obrobené novou technológiou. Po obrobení týchto krúžkov a následnom premeraní bolo zistené výrazné zlepšenie celkovej hlučnosti ložísk, pričom sa tento konkrétny problém eliminoval.

Posledným krokom bol experiment celej zákazky na novšom type honovacieho stroja. Analyzovaním hlučnosti vyrobených ložísk bola stanovená nepodarkovosť procesu. Použitím staršej technológie sa hodnoty nepodarkovosti pohybovali do 3%, po obrobení na novšom type honovacieho stroja sa nepodarkovosť zmenšila na 0,9%.

Výsledkom navrhnutých a realizovaných opatrení bolo zmenšenie nepodarkovosti procesu výroby o skoro 70%, čo je možno považovať za najvýznamnejší praktický prínos diplomovej práce. Podnik bol síce schopný detegovať ložiská so zvýšenou hlučnosťou, no po implementovaní nového honovacieho stroja sa tieto ložiská vôbec nevyskytnú. Podniku sa tak môžu reálne znížiť náklady spojené s nepodarkovosťou.

Posledné dva ciele – technické posúdenie dosiahnutých výsledkov a vlastné závery a odporúčenie pre prax sú uvedené v zhodnotení, kapitola č. 9. Podniku bolo odporúčené implementovanie nového honovacieho stroja do výroby analyzovaných vonkajších krúžkov. Ďalšou z výhod použitia novej technológie sú menšie náklady na servis stroja. Pri staršom type stroja sa často vyskytovali problémy a garančný servis bol rok od roku drahší.

Záverom treba dodať, že vo výskume problému hlučnosti je potrebné ďalej pokračovať.

11 ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

- [1] *Katalóg ložísk: ZVL Slovakia* [online], 2012. Žilina [cit. 2020-06-12]. Dostupné z: <https://www.zvlloziska.sk/wp-content/uploads/Katalog-lozisk-ZVL.pdf>
- [2] Druhy valivých ložísk, tiež dostupné z: <https://www.openpr.com/news/615591/global-bearings-market-2017-skf-schaeffler-nsk-timken-jtekt-ntn-nachi-nmb-rexnord-zwz-c-u-group.html>
- [3] Prednáška VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Autor: JANKOVÝCH, Róbert a HOLUB, Michal: Analýza procesů
- [4] Konštrukcia valčekového ložiska, tiež dostupná z: http://stachura.cz/novy/strojni/druhy_lozisek.htm
- [5] MATĚJKA, Bohuslav a Jaromír MÁČA, 1984. *Technológia valivých ložísk: obrábanie*. Bratislava: Alfa.
- [6] Schéma bezhrotového brúsenia, tiež dostupná z: <https://www.schell-tools.com/en/work-rest-blades-centerless-grinding>
- [7] Výber ložísk: Ihlové ložiská s nákrážkami bez vnútorného krúžku. *KINEX* [online]. [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: http://www.kinex.sk/index.php/produkty/produkty-valiveloz?view=bearingcatalog&bearing_caterory=50&fullw=1
- [8] BERAN, Vlastimil, 2010. *Chvění a hluk*. V Plzni: Západočeská univerzita. ISBN 978-80-7043-916-6.
- [9] NOVÝ, Richard, 2009. *Hluk a chvění*. Vyd. 3. V Praze: České vysoké učení technické. ISBN 978-80-01-04347-9.
- [10] HELEBRANT, František a Jiří ZIEGLER, 2004. *Technická diagnostika a spolehlivost*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita. ISBN 80-248-0650-9.
- [11] Schéma piezoelektrického akcelerometra, tiež dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=59170
- [12] TŮMA, Jiří, 1997. *Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT*. Praha: Sdělovací technika. ISBN 80-901-9361-7.
- [13] Princíp rozkladu signálu vibrácií, tiež dostupné z: <https://www.ifm.com/us/en/us/real-time-maintenance/vibration/technology/frequency-domain>
- [14] Aquastyl Slovakia s.r.o., školenie: Meranie vibrácií valivých ložísk
- [15] NĚMEC, Jaroslav, Jiří RANS DORF a Milan ŠNĚDRLE, 1970. *Hluk a jeho snižování v technické praxi*. Praha: Nakladatelství technické literatury. Řada strojírenské literatury.
- [16] ISO 15242-4, 2017. *Rolling bearings- Measuring methods for vibration: Radial cylindrical roller bearings with cylindrical bore and outside surface*. Second edition.
- [17] TANDON, Naresh a Achintya CHOUDHURY, 1999. A review of vibration and acoustic measurement methods for the detection of defects in rolling element bearings. *Tribology International*. (32), 11. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0301-679X\(99\)00077-8](https://doi.org/10.1016/S0301-679X(99)00077-8). ISSN 0301-679X.
- [18] SCHAEFFLER, Prístroj na meranie hlučnosti Gpr – Návod na obsluhu
- [19] ACCELEROMETERS: MODEL: 352C34. *PCB PIEZOTRONICS* [online]. [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: <https://www.pcb.com/products?m=352C34>
- [20] SCHAEFFLER, 3D model vonkajšieho krúžku ložiska

- [21] Prednáška VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Autor: JANKOVÝCH, Róbert: Metrologie kruhovitosti
- [22] Typy referenčných kružníc, tiež dostupné z: https://www.weisang.com/en/documentation/circleapproximationanalysis_en/
- [23] Vplyv filtrácie, tiež dostupné z: <https://slideplayer.com/slide/13789251/>
- [24] SCHAEFFLER, podniková norma: Spektrálna analýza W_{RTA} – Obvodová vlnitosť
- [25] Vše o ČMI. ČMI [online]. [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: https://www.cmi.cz/vse_o_cmi
- [26] Kruhomer Talyrond 595, tiež dostupné z: <https://www.directindustry.com/prod/taylor-hobson/product-7159-421656.html>
- [27] SU, Yawterng, M. H. LIN a Mingsan LEE, 1993. The Effects of Surface Irregularities on Roller Bearing Vibrations. *Journal of Sound and Vibration*. (165), 11. DOI: <https://doi.org/10.1006/jsvi.1993.1270>. ISSN 0022-460X.
- [28] TANDON, Naresh a Achintya CHOUDHURY, 1997. AN ANALYTICAL MODEL FOR THE PREDICTION OF THE VIBRATION RESPONSE OF ROLLING ELEMENT BEARINGS DUE TO A LOCALIZED DEFECT. *Journal of Sound and Vibration*. (205), 17. DOI: <https://doi.org/10.1006/jsvi.1997.1031>. ISSN 0022-460X.

12 ZOZNAM OBRÁZKOV A TABULIEK

12.1 Zoznam tabuliek

TAB 1) TABUĽKA ŠTANDARDNÝCH HODNÔT RADIÁLNEHO ZAŤAŽENIA PODĽA NORMY ISO 15242.....	49
TAB 2) TABUĽKA ŠTANDARDNÝCH FREKVENČNÝCH PÁSIEM PODĽA NORMY ISO 15242	50
TAB 3) PARAMETRE AKCELEROMETRA.....	55
TAB 4) TABUĽKA NASTAVENIA VSTUPNÝCH PARAMETROV PÔVODNÉHO HONOVACIEHO STROJA	67
TAB 5) TABUĽKA NASTAVENIA VSTUPNÝCH PARAMETROV NOVÉHO HONOVACIEHO STROJA	67
TAB 6) TABUĽKA POROVNANIA NEPODARKOVOSTI TECHNOLOGIÍ HONOVANIA	75

12.2 Zoznam obrázkov

OBR. 1) GRAFICKÉ ZOBRAZENIE REKLAMÁCIE.....	19
OBR. 2) CHYBA NA 14. TOLERANČNOM POLI FREKVENČNÉHO SPEKTRA	20
OBR. 3) DRUHY VALIVÝCH LOŽÍSK	21
OBR. 4) POŽIADAVKY NA KVALITU LOŽÍSK.....	22
OBR. 5) KONŠTRUKCIA VALČEKOVÉHO LOŽISKA	25
OBR. 6) POSTUPOVÝ DIAGRAM VÝROBY KRÚŽKOV	26
OBR. 7) SCHÉMA BEZHROTOVÉHO BRÚSENIA	28
OBR. 8) POSTUPOVÝ DIAGRAM MONTÁŽNEJ LÍNIE LOŽISKA	30
OBR. 9) SCHÉMA JEDNODUCHÉHO KMITANIA	33
OBR. 10) SCHÉMA PIEZOELEKTRICKÉHO AKCELEROMETRA	36
OBR. 11) PRINCÍP ROZKLADU SIGNÁLU VIBRÁCIÍ	37
OBR. 12) PARAMETRE PERIODICKÉHO SIGNÁLU	38
OBR. 13) PRINCÍP METÓDY CREST FAKTOR	38
OBR. 14) PRINCÍP OBÁLKOVEJ ANALÝZY	39
OBR. 15) POLOHA SNÍMAČA A ZAŤAŽENIA.....	51
OBR. 16) TOLERANCIA NAKLOPENIA SNÍMAČA	51
OBR. 17) „HLUKOMER“ POUŽÍVANÝ V PODNIKU.....	52
OBR. 18) SCHÉMA FUNKCIE „HLUKOMERU“	53
OBR. 19) PRÍKLAD VYHODNOTENIA HLUČNOSTI.....	54
OBR. 20) VYHODNOTENIE CHYBY LOŽISKA NA 14. TOLERANČNOM POLI	57
OBR. 21) MODEL VONKAJŠIEHO KRÚŽKU LOŽISKA	58

<i>OBR. 22) OZNAČENIE KRUHOVITOSTI</i>	<i>59</i>
<i>OBR. 23) TYPY REFERENČNÝCH KRUŽNÍC</i>	<i>59</i>
<i>OBR. 24) VPLYV FILTRÁCIE</i>	<i>60</i>
<i>OBR. 25) ROZLOŽENIE SIGNÁLU DO SPEKTRA RTA</i>	<i>62</i>
<i>OBR. 26) KRUHOMER TALYROND 595</i>	<i>62</i>
<i>OBR. 27) FOTOGRAFIA MERANIA KRUHOVITOSTI KRÚŽKU V ČMI.....</i>	<i>63</i>
<i>OBR. 28) KRUHOVITOSŤ KRÚŽKU MERANÁ NA VNÚTORNEJ PLOCHE.....</i>	<i>64</i>
<i>OBR. 29) KRUHOVITOSŤ KRÚŽKU MERANÁ NA VONKAJŠEJ PLOCHE</i>	<i>64</i>
<i>OBR. 30) SCHÉMA HONOVANIA - STARÁ TECHNOLOGIA</i>	<i>65</i>
<i>OBR. 31) SCHÉMA HONOVANIA - NOVÁ TECHNOLOGIA</i>	<i>66</i>
<i>OBR. 32) RTA KRÚŽKU AU 1 – ŠTANDARDNÉ NASTAVENIA STROJA.....</i>	<i>68</i>
<i>OBR. 33) RTA KRÚŽKU AU 2 - JEDNA ZASTÁVKA HONOVANIA.....</i>	<i>68</i>
<i>OBR. 34) RTA KRÚŽKU AU 3 - NASTAVENIE OTÁČOK KRÚŽKU 2000.....</i>	<i>69</i>
<i>OBR. 35) RTA KRÚŽKU AU 4 - NASTAVENIE OTÁČOK KRÚŽKU 1000</i>	<i>69</i>
<i>OBR. 36) RTA KRÚŽKU AU 5 - NASTAVENIE ČASU OBRÁBANIA 9 S.....</i>	<i>70</i>
<i>OBR. 37) RTA KRÚŽKU AU 6 - OTÁČKY VAČKY 160.....</i>	<i>70</i>
<i>OBR. 38) RTA KRÚŽKU AU 7 - NASTAVENIE MALEJ OSCILÁCIE 0,2 MM.....</i>	<i>71</i>
<i>OBR. 39) RTA KRÚŽKU AU 8 - NASTAVENIE MALEJ OSCILÁCIE 0,5 MM.....</i>	<i>71</i>
<i>OBR. 40) RTA KRÚŽKU AU 9 - NASTAVENIE MALEJ OSCILÁCIE 0,8 MM.....</i>	<i>72</i>
<i>OBR. 41) RTA KRÚŽKU AU 10 - NASTAVENIE MALEJ OSCILÁCIE 1,0 MM.....</i>	<i>72</i>
<i>OBR. 42) „HLUČNOSŤ“ LOŽISKA OBROBENÉHO STARŠOU TECHNOLOGIOU (</i> <i>OBR. A - CELÉ SPEKTRUM, OBR. B - DETAIL SPEKTRA).....</i>	<i>73</i>
<i>OBR. 43) „HLUČNOSŤ“ LOŽISKA OBROBENÉHO NOVŠOU TECHNOLOGIOU</i> <i>(OBR. A - CELÉ SPEKTRUM, OBR. B - DETAIL SPEKTRA)</i>	<i>74</i>

13 ZOZNAM PRÍLOH

- Príloha č. 1 – Výkresové rozmery vonkajšieho krúžku ložiska
- Príloha č. 2 – Protokoly z podniku
- Príloha č. 3 – Protokoly z ČMI
- Príloha č. 4 – Protokoly simulácie
- Príloha č. 5 – Porovnanie analýzy hlučnosti technológií honovania